

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
des Fachbereichs Medizin
der Philipps-Universität Marburg

Geschäftsführende Direktorin:
Univ.-Prof. Dr. Heike Korbmacher-Steiner

Abteilung für Zahnerhaltungskunde
Direktor: Univ.-Prof. Dr. Roland Frankenberger

Eine klinisch-prospektive Studie zu Klasse-II-Kompositfüllungen in Bulk- versus Inkrementtechnik

—

Resultate nach neun Jahren

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg
vorgelegt von

Anna-Lena Sophie Rettinger, geb. Kurtz
aus Reutlingen

Marburg, 2021

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am: 20.09.2021

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin.

Dekanin: Frau Prof. Dr. D. Hilfiker-Kleiner

Referent: Herr Prof. Dr. R. Frankenberger

1. Korreferent: Herr Prof. Dr. U. Lotzmann

Für meine Familie

... zusammenhalten ...

Inhaltsverzeichnis

I.	Abkürzungsverzeichnis	I
II.	Abbildungsverzeichnis	II
III.	Tabellenverzeichnis	VII
1	Einführung	1
2	Literaturübersicht	3
2.1	Adhäsivtechnik	3
2.1.1	Entwicklung und Klassifikation	3
2.1.2	Schmelzhaftung	5
2.1.3	Dentinhaftung	6
2.1.4	Anforderungen an Adhäsivsysteme	9
2.1.5	Wertung unterschiedlicher Adhäsivsysteme	11
2.2	Kompositmaterialien	13
2.2.1	Entwicklung	13
2.2.2	Zusammensetzung und Einteilung	14
2.2.3	Organische Phase	15
2.2.4	Anorganische Phase	18
2.2.5	Verbundphase	18
2.2.6	Polymerisationsmechanismen	19
2.2.7	Füllungskonzepte	21
2.2.8	Konventionelle und Bulk-Fill-Komposite im Vergleich	25
2.3	Charakteristika der verwendeten Komposite	27
2.3.1	SonicFill	27
2.3.2	Herculite XRV Ultra	33
3	Fragestellung und Zielsetzung	35
4	Material und Methoden	36
4.1	Studiendesign	36

4.2	Patientenauswahl	36
4.3	Präparation und Füllungslegung.....	37
4.4	Bewertungskriterien und Dokumentation.....	38
4.5	Ablauf der Nachuntersuchung.....	46
4.6	Statistik	47
4.7	Ethikvotum.....	47
5	Ergebnisse.....	48
5.1	Ergebnisse der ästhetischen Eigenschaften FDI 1–3	50
5.1.1	FDI 1: Oberflächenglanz und Poren	50
5.1.2	FDI 2a: Oberflächenverfärbung.....	57
5.1.3	FDI 2b: Randverfärbung	60
5.1.4	FDI 3: Farbübereinstimmung und Transluzenz	63
5.2	Ergebnisse der funktionellen Eigenschaften FDI 5–10	68
5.2.1	FDI 5: Materialfraktur und Retention	68
5.2.2	FDI 6a: marginale Randfraktur	73
5.2.3	FDI 6b: Randspalt	76
5.2.4	FDI 6c: Randdefizit.....	79
5.2.5	FDI 8a: Approximalkontakt.....	82
5.2.6	FDI 10: Patientensicht	85
5.3	Ergebnisse der biologischen Eigenschaften FDI 11–13	87
5.3.1	FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten und Zahnvitalität	87
5.3.2	FDI 12: Sekundärkaries.....	92
5.3.3	FDI 13: Zahnintegrität	94
6	Diskussion	97
6.1	Material- und Methodendiskussion	97
6.1.1	Studiendesign.....	98
6.1.2	Patientenauswahl.....	99

6.1.3	Klinische Vorgehensweise	101
6.1.4	Bewertungskriterien.....	102
6.1.5	Nachuntersuchung	105
6.1.6	Beobachtungszeitraum	106
6.2	Ergebnisdiskussion	106
6.2.1	Diskussion der ästhetischen Eigenschaften: FDI 1, 2 und 3	107
6.2.2	Diskussion der funktionellen Eigenschaften: FDI 5, 6, 8 und 10	110
6.2.3	Diskussion der biologischen Eigenschaften: FDI 11, 12 und 13	114
6.3	Schlussfolgerung	117
7	Zusammenfassungen.....	118
7.1	Zusammenfassung (deutsch)	118
7.2	Abstract.....	120
8	Literatur	122
9	Anhang.....	143
9.1	Materialliste	143
9.2	Untersuchungsbogen	144
9.3	DSGVO-Einverständniserklärung	146
9.4	Fragebogen zur Prävention 2019-nCoV	147
9.5	Lebenslauf	148
9.6	Verzeichnis der akademischen Lehrer/-innen	149
9.7	Danksagung.....	150

I. Abkürzungsverzeichnis

µm.....	Mikrometer
Bis-GMA	Bisphenol-A-Glycidyl-Methacrylat
bzw.....	beziehungsweise
CMD	Craniomandibuläre Dysfunktion
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
engl.	englisch
et al.	et alii
Gew. %.....	Gewichtsprozent
HEMA	Hydroxyethylmethacrylat
Kap.	Kapitel
MDP	Methacryloyloxydecyldihydrogenphosphat
mm.....	Millimeter
MPa.....	Megapascal
nm.....	Nanometer
o.ä.	oder ähnliche
PMMA	Polymethylmethacrylat
TEGDMA.....	Triethylenglycoldimethacrylat
u.a.	unter anderem
UDMA	Urethandimethacrylat
USPHS	United States Public Health Service
Vol.%.....	Volumenprozent
z.B.	zum Beispiel
γ-MPS.....	3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan

II. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Entwicklung der Scherhaftfestigkeit im Dentin verschiedener Generationen [182].....	10
Abb. 2: Radikalbildung von Campherchinon	16
Abb. 3: Schematische Darstellung der Polymerbildung und Polymerisationsschrumpfung.....	17
Abb. 4: Begriffe zur Lichthärtung	21
Abb. 5: Verschiedene Formen der Schichttechnik	22
Abb. 6: Schematische Darstellung des C-Faktors	23
Abb. 7: SonicFill-Handstück und Größenvergleich der Kapselöffnung mit einer Herculite-XRV-Ultra-Kompositkapsel	28
Abb. 8: Regelung der Intensität über den Fußanlasser oder den Ringschalter am Handstück.....	28
Abb. 9: Aufschrauben einer SonicFill-Kapsel auf das Handstück	29
Abb. 10: Einbringen von Komposit mit dem SonicFill-System in der Bulk-Fill-Technik .	30
Abb. 11: Viskositätsänderung von SonicFill unter Schalleinwirkung (vereinfachte Darstellung) [110]	31
Abb. 12: Herculite XRV Ultra als Einzelkapseln [109]	33
Abb. 13: Herculite XRV Ultra in Schmelz- und Dentinfarben in Spritzenapplikatoren [109].....	34
Abb. 14: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 1: Oberflächenglanz in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	51
Abb. 15: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 1: Oberflächenglanz in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	51
Abb. 16: FDI 1 (Oberflächenglanz), Score 1: Füllung an 18 mo (SF): Glanz vergleichbar mit Schmelz	52
Abb. 17: FDI 1 (Oberflächenglanz), Score 3.1: Füllung an 36 mod (SF) nach Trocknung: matte Oberfläche, aber akzeptabel, wenn mit Speichelfilm benetzt. Deutlich sichtbar ist die matte, trockene Oberfläche	53
Abb. 18: FDI 1 (Oberflächenglanz), Score 3.1: gleiche Restauration wie in Abb.17,	53

Abb. 19: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 1: Poren in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	55
Abb. 20: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 1: Poren in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf.....	55
Abb. 21: FDI 1 (Poren), Score 1: Füllung an 35 od (HU): Glanz vergleichbar mit Schmelz	56
Abb. 22: FDI 1 (Poren), Score 3.1: Füllung an 46 mo (HU): multiple Poren in mehr als einem Drittel der Füllungsoberfläche	56
Abb. 23: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 2a: Oberflächenverfärbung in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	58
Abb. 24: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 2a: Oberflächenverfärbung in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	58
Abb. 25: FDI 2a, Score 1: Füllung an 24 od (HU): keine Oberflächenverfärbung.....	59
Abb. 26: FDI 2a, Score 2: Füllung an 36 ob (HU): leichte Oberflächenverfärbung, einfach durch Politur zu beheben	59
Abb. 27: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 2b: Randverfärbung in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	61
Abb. 28: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 2b: Randverfärbung in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	61
Abb. 29: FDI 2b, Score 1: Füllung an 16 mod (SF): keine Randverfärbung.....	62
Abb. 30: FDI 2b, Score 3: Füllung an 24 mod (SF): mäßige Randverfärbung, nicht ästhetisch inakzeptabel, Verfärbung im approximalen Kasten	62
Abb. 31: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 3: Farbübereinstimmung in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	64
Abb. 32: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 3: Farbübereinstimmung in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	64
Abb. 33: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 3: Transluzenz in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	66

Abb. 34: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 3: Transluzenz in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	66
Abb. 35: FDI 3, Score 1: Füllung an 15 mo (SF): in Farbe und Transluzenz gute Farbanpassung, kein Unterschied in Schattierung und/oder Transluzenz	67
Abb. 36: FDI 3, Score 3: Füllung an 15 mod (SF): deutliche aber akzeptable Abweichung, beeinträchtigt nicht die Ästhetik.....	67
Abb. 37: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 5: Materialfraktur und Retention in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	70
Abb. 38: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 5: Materialfraktur und Retention in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	70
Abb. 39: FDI 5, Score 1: Füllung an 47 mo (SF): keine Fraktur oder Risse.....	71
Abb. 40: FDI 5, Score 3: Füllung an 14 od (SF): zwei oder mehrere längere Haarrisse und/oder Materialabplatzungen, die die marginale Integrität oder den Approximalkontakt nicht beeinträchtigen. Materialabplatzung an der distopalatinalen Füllungsfläche ohne Verlust des Approximalkontaktes.....	71
Abb. 41: FDI 5, Score 4: Füllung an 24 mod (HU): Abplatzungen, die die marginale Integrität oder den Approximalkontakt beeinträchtigen oder Massenfraktur, mit partiellm Füllungsverlust (weniger als die Hälfte der Restauration). Sichtbare Materialfraktur im distalen Kasten mit Verlust des Approximalkontaktes, folglich auch in FDI 8a die Wertung mit Score 3.	72
Abb. 42: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6a: marginale Randfraktur in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	74
Abb. 43: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6a: marginale Randfraktur in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	74
Abb. 44: FDI 6a, Score 1: Füllung an 25 mod (HU): harmonisches Bild, keine Spalten, weiße oder verfärbte Linien	75
Abb. 45: FDI 6a, b, und c, Score 5: Füllung an 48 mo (SF): a und c: Generalisiert große Lücken oder Unregelmäßigkeiten, b: Restauration (ganz oder teilweise) locker aber in situ	75

Abb. 46: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6b: Randspalt in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	77
Abb. 47: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6b: Randspalt in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	77
Abb. 48: FDI 6b, Score 1: Füllung an 25 mod (HU): harmonisches Bild, keine Spalten, weiße oder verfärbte Linien	78
Abb. 49: FDI 6b, Score 3: Füllung an 35 od (SF): Spalt <250µm, nicht entfernbar.....	78
Abb. 50: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6c: Randdefizit in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	80
Abb. 51: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6c: Randdefizit in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	80
Abb. 52: FDI 6c, Score 1: Füllung an 15 mo (SF): harmonisches Bild, keine Spalten, weiße oder verfärbte Linien	81
Abb. 53: FDI 6c, Score 3: Füllung an 46 ob (SF): größere Unregelmäßigkeiten, Furchen oder Grate, Stufen. Zudem sichtbare starke Abrasion.....	81
Abb. 54: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 8a: Approximalkontakt in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	83
Abb. 55: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 8a: Approximalkontakt in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	83
Abb. 56: FDI 8a, Score 1: Füllungen an 25 od, 26 mo (SF): Normaler Kontaktpunkt, Zahnseide oder 25 µm dickes Metallblatt können passieren	84
Abb. 57: FDI 8a, Score 3: Füllung an 18 mo (HU): etwas schwacher Kontakt, kein Hinweis auf Beschädigungen des Zahnes, der Gingiva oder parodontaler Strukturen, 50 µm dickes Metallblatt kann passieren. Deutlich sichtbare Speiseimpaktion bei entzündungsfreier Gingiva.....	84
Abb. 58: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 10: Patientensicht in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	86

Abb. 59: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 10: Patientensicht in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	86
Abb. 60: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	89
Abb. 61: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf.....	89
Abb. 62: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 11: Vitalität in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	91
Abb. 63: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 11: Vitalität in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	91
Abb. 64: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 12: Sekundärkaries in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	93
Abb. 65: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 12: Sekundärkaries in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	93
Abb. 66: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 13: Zahnintegrität in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	95
Abb. 67: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 13: Zahnintegrität in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf	95
Abb. 68: FDI 13, Score 1: Füllung an 14 mod (SF): Totale Unversehrtheit.....	96
Abb. 69: FDI 13, Score 3: Füllung an 47 mo (HU): Schmelzdefekt und Riss > 250 μ m, Schmelzchipping. Sichtbares Schmelzchipping im mesiobukkalen Kasten.....	96

III. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Klassifikationen der Adhäsivsysteme [65, 67, 87]	4
Tab. 2: Klassifikation der Komposite nach Lutz et al. [124].....	15
Tab. 3: Mechanische Eigenschaften und Inhaltsstoffe von SonicFill.....	32
Tab. 4: Mechanische Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Herculite XRV Ultra	34
Tab. 5: Übersicht der FDI Kriterien	40
Tab. 6: Detaillierte Auflistung der untersuchten FDI-Einzelkriterien, in deutscher Übersetzung [91]	41
Tab. 7: Recallraten zu den Zeitpunkten T_0 und T_2	48
Tab. 8: Verteilung der Restaurationen nach Zahntypen zum Zeitpunkt T_2	49
Tab. 9: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 1: Oberflächenglanz zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	50
Tab. 10: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 1: Oberflächenglanz in beiden Materialgruppen.....	50
Tab. 11: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 1: Poren zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	54
Tab. 12: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 1: Poren in beiden Materialgruppen	54
Tab. 13: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 2a: Oberflächenverfärbung zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	57
Tab. 14: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 2a: Oberflächenverfärbung in beiden Materialgruppen	57
Tab. 15: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 2b: Randverfärbung zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	60
Tab. 16: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 2b: Randverfärbung in beiden Materialgruppen.....	60
Tab. 17: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 3: Farbübereinstimmung zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	63
Tab. 18: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 3: Farbübereinstimmung in beiden Materialgruppen.....	63

Tab. 19: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 3: Transluzenz zu den Zeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	65
Tab. 20: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 3: Transluzenz in beiden Materialgruppen.....	65
Tab. 21: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 5: Materialfraktur und Retention zu den Zeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	69
Tab. 22: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 5: Materialfraktur und Retention in beiden Materialgruppen	69
Tab. 23: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6a: marginale Randfraktur zu den Zeitpunkten T ₀ ,T ₁ ,T ₂	73
Tab. 24: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6a: marginale Randfraktur in beiden Materialgruppen.....	73
Tab. 25: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6b: Randspalt zu den Zeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	76
Tab. 26: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6b: Randspalt in beiden Materialgruppen.....	76
Tab. 27: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6c: Randdefizit zu den Zeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	79
Tab. 28: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6c: Randdefizit in beiden Materialgruppen.....	79
Tab. 29: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 8a: Approximalkontakt zu den Zeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	82
Tab. 30: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 8a: Approximalkontakt in beiden Materialgruppen.....	82
Tab. 31: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 10: Patientensicht zu den Zeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	85
Tab. 32: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 10: Patientensicht in beiden Materialgruppen.....	85
Tab. 33: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten zu den Zeitpunkten T ₀ , T ₁ , T ₂	88
Tab. 34: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten in beiden Materialgruppen	88

Tab. 35: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 11: Vitalität zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	90
Tab. 36: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 11: Vitalität in beiden Materialgruppen.....	90
Tab. 37: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 12: Sekundärkaries zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	92
Tab. 38: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 12: Sekundärkaries in beiden Materialgruppen.....	92
Tab. 39: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 13: Zahnintegrität zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2	94
Tab. 40: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 13: Zahnintegrität in beiden Materialgruppen.....	94
Tab. 41: Übersicht über das Studiendesign bisheriger in-vivo-Studien zum klinischen Verhalten von Bulk-Fill-Kompositen in Klasse-II-Kavitäten an bleibenden Zähnen aufsteigend nach der Laufzeit	101
Tab. 42: Original und modifizierte USPHS-Kriterien.....	103

1 Einführung

Das zentrale Ziel der konservierenden Zahnheilkunde ist die Gesunderhaltung eines naturgesunden Gebisses. Durch etablierte Maßnahmen der Primärprophylaxe, wie u.a. ein konsequentes Biofilmmangement mittels fluoridhaltiger Zahnpasten und chlorhexidinhaltiger Lacke, die Teilnahme an Prophylaxeprogrammen und eine zahngesunde Ernährung, kann die Entstehung von kariösen Läsionen wirkungsvoll vermieden werden [53]. Die fünfte deutsche Mundgesundheitsstudie von 2016 zeigte, dass durch stetige Prophylaxe, Aufklärung und verbesserte Mundhygiene die Kariesinzidenz in Deutschland bereits deutlich reduziert werden konnte [43]. Dennoch ist die Karies im zahnärztlichen Behandlungsalltag omnipräsent. Ist eine kariöse Läsion entstanden, ist es die Aufgabe der Sekundärprophylaxe diese, wenn möglich, zu remineralisieren oder eine schnelle Progression durch geeignete Restaurationsmaterialien zu verhindern. Das Auftreten von Primärkaries oder insuffizienten Restaurationen mit damit einhergehender Sekundärkaries führen häufig zu großen Zahnschubstanzverlusten [73]. Ziel ist es daher, mittels langlebiger Versorgungsmöglichkeiten der weiteren Zerstörung der Zahnschubstanz entgegenzutreten und gesunde Zahnhartsubstanz zu erhalten.

Das seit über 200 Jahren erfolgreich verwendete Amalgam tritt dabei aufgrund kontrovers geführter Debatten über mögliche Gesundheitsschäden sowie gesteigerter ästhetischer Ansprüche seitens der Patienten zunehmend in den Hintergrund [169]. Dem gegenüber steht die lange klinische Überlebensrate von Amalgam von bis zu 20 Jahren [133, 134, 173]. Allerdings ist die für eine suffiziente Verankerung von Amalgam notwendige retentive Präparationsform mit den heute verfügbaren minimalinvasiven Versorgungsmöglichkeiten nicht mehr vereinbar. Durch eine stetige Weiterentwicklung und Verbesserung der Komposite haben diese sich als Alternative etabliert und Amalgam nahezu verdrängt [113]. Die Hauptgründe für das Scheitern von Kompositfüllungen sind die Bildung von Sekundärkaries durch Randspalten, sowie Füllungs- und Zahnfrakturen [50, 143]. Dies sind Folgeerscheinungen der materialtechnischen Eigenschaften der Komposite, oder einer falsch angewandten Adhäsivtechnik, ungenügenden Belichtung oder mangelhaften Schichttechnik. Die verfügbaren Komposite wurden daher weiter modifiziert, um die Nachteile, wie eine geringe Polymerisationstiefe und

hohe Schrumpfungswerte, auszugleichen. Unter anderem wurden niedrigvisköse Liner als Unterfüllung oder verschiedene Schichttechniken etabliert [41, 170].

Die klassische 2 mm-Inkrementtechnik gilt bisher als Standardmethode um eine ausreichende Durchhärtung des Komposits zu erreichen und die Schrumpfkkräfte zu kontrollieren [166]. Eine ungenügende Aushärtung hat negative Einflüsse auf die mechanischen, physikalischen und biokompatiblen Eigenschaften des Komposits und gewinnt dadurch oberste Priorität bei der Füllungstherapie [97]. Aufgrund der Vielzahl an Behandlungsschritten bei der Inkrementtechnik und der damit verbundenen Risiken, wie z.B. der Speichel- oder Blutkontamination zwischen einzelnen Schichten, sowie des hohen Zeitaufwandes war der Wunsch nach einer Vereinfachung groß [177]. Bulk-Fill-Komposite, die in einer Schicht appliziert und in Tiefen von bis zu 5 mm durchgehärtet werden können, versprachen diesbezüglich eine deutliche Verbesserung für den Behandler als auch den Patienten. Die zunächst verfügbaren fließfähigen Bulk-Fill-Komposite müssen aber aufgrund der schlechteren mechanischen Eigenschaften mit einer Schicht konventionellen Komposits überdeckt werden [100]. Später auf den Markt gebrachte hochvisköse Bulk-Fill-Komposite können hingegen in einem einzigen Inkrement eingebracht werden, ohne eine zusätzliche Deckschicht zu benötigen.

Durch die Schallaktivierung des in dieser Studie verwendeten Bulk-Fill-Komposits SonicFill lassen sich die Vorteile eines niedrigviskösen mit denen eines hochviskösen Komposits kombinieren, ohne die Notwendigkeit einer zusätzlichen okklusalen Deckschicht. Bulk-Fill-Komposite wurden bereits in zahlreichen in-vitro Studien hinsichtlich ihrer physikalischen und mechanischen Eigenschaften untersucht. Klinische Langzeitstudien sind dagegen kaum vorhanden. Das Interesse an ihnen ist sehr hoch, da sich erst durch sie der langfristige klinische Erfolg von Bulk-Fill-Kompositen beurteilen lässt [200].

Ziel dieser Studie war es, das klinische Langzeitverhalten von Klasse-II-Restaurationen des Bulk-Fill-Komposits SonicFill zu untersuchen und mit dem des etablierten, klassisch geschichteten Komposits Herculite XRV Ultra zu vergleichen.

2 Literaturübersicht

2.1 Adhäsivtechnik

Durch die Einführung der Adhäsivtechnik in der Zahnmedizin können Kavitäten deutlich substanzschonender präpariert und minimalinvasiv versorgt werden [40]. Eine suffiziente Verankerung des Füllwerkstoffes auf der Zahnhartsubstanz ist dabei essentiell. Bereits mit der Aushärtung des Komposits können als Folge von Schrumpfungsprozessen (Polymerisationsschrumpfung) und der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Zahn und Komposit Randspalten entstehen, die zu Sekundärkaries und frühzeitigem Füllungsverlust führen können [66, 88]. Durch die Adhäsivtechnik entsteht eine vergrößerte und konditionierte Oberfläche, die eine mikromechanische Verankerung des Komposits auf der Zahnschmelzsubstanz ermöglicht. Die damit erreichte Haftung stellt einen wirksamen Antagonismus zur Polymerisationsschrumpfung dar [68].

2.1.1 Entwicklung und Klassifikation

Die Schmelz-Ätz-Technik geht auf eine 1955 von Buonocore veröffentlichte Arbeit zurück, in der er die Vorbehandlung des Zahnschmelzes mittels 85%iger Phosphorsäure für zwei Minuten beschreibt. Dies führte zu einer deutlichen Haftverbesserung der damals verwendeten Acrylate [36]. Da diese aber noch sehr hohe Schrumpfungswerte aufwiesen und folglich keinen Haftverbund mit der Zahnschmelzsubstanz eingehen konnten, hatte Buonocores Entdeckung zunächst nur geringen Einfluss auf die adhäsive Zahnheilkunde [185].

Im Gegensatz zum Schmelz ist das Dentin ein vitales Gewebe mit einem hohen Kollagenanteil und nur geringen mineralischen Substraten [130]. Eine analoge Behandlung der Dentineoberfläche mit Phosphorsäure war aufgrund dieser Zusammensetzung und der Hydrophilie des Dentins nicht möglich und blieb erfolglos [37]. Um jedoch die gesamte Dentineoberfläche zur Verankerung nutzen zu können, mussten geeignete Dentinehaftvermittlungssysteme (Adhäsive) entwickelt werden. Diese kamen erst mehrere Jahrzehnte später auf den Markt [54]. Die einzelnen Entwicklungsstufen der Dentineadhäsive wurden früher auch als "Generationen" bezeichnet und sind gekennzeichnet durch die stetige Vereinfachung der Anwendung. Alternativ zu den acht Generationen

der Adhäsivsysteme können sie auch anhand der Applikationsschritte unterschieden werden (Tab. 1).

Tab. 1: Klassifikationen der Adhäsivsysteme [66, 68, 88]

Gen.	Applikationsschritte	Präparatebeispiele
1./ 2.	Versuche der Verbindung mit der Schmierschicht. Klinisch kein Erfolg, da zu geringe Haftung und hohe Hydrolyseanfälligkeit.	
3.	<u>Drei-/Vier-Schritt-Selective-Etching</u> 1. Selektive Schmelzätzung 2. dentinkonditionierender Primer 3. Adhäsiv 4. ggf. Schmelzbonding	Gluma (Bayer Dental) Syntac (Ivoclar Vivadent) A.R.T. Bond (Coltène)
4.	<u>Drei-Schritt-Total-Etching</u> 1. Simultane Ätzung von Schmelz und Dentin (Etch&rinse) 2. Primer 3. Adhäsiv	OptiBond FL (Kerr) Clearfil Photo Bond (Kuraray Noritake) Solobond Plus (VOCO)
5.	<u>Zwei-Schritt-Total-Etching</u> 1. Etch&rinse 2. Primer-Adhäsiv-Gemisch (selbstprimendes Adhäsiv, one-bottle-bonds)	Prime&Bond NT / Prime&Bond XP (Dentsply Sirona) iBOND Total Etch (Kulzer) OptiBond Solo Plus (Kerr)
6.	<u>Zwei-Schritt-Self-Etching</u> Keine Ätzung mit separater Säure 1. selbstätzender Primer (gebrauchsfertig oder zum Anmischen) 2. Adhäsiv	Clearfil SE Bond /Clearfil Liner Bond 2V (Kuraray Noritake) OptiBond eXTRa Universal (Kerr) Adper Scotchbond Multi-Purpose Adhäsiv (3M Espe)
7./ 8.	<u>Ein-Schritt-Self-Etching</u> All-in-One-Adhäsive 1. Selbstätzendes-selbstprimendes Adhäsiv (gebrauchsfertig oder zum Anmischen) 8. Generation: Nanofüller-Zusatz	Scotchbond Universal (3M Espe) Adper Prompt L-Pop (3M Espe) Futurabond M (VOCO) Futurabond NR (VOCO) OptiBond Universal (Kerr) Clearfil Universal Bond Quick/ Clearfil S2 Bond (Kuraray Noritake) Prime&Bond active (Dentsply Sirona) Adhese Universal (Ivoclar Vivadent) iBOND Universal (Kulzer)

2.1.2 Schmelzhaftung

Aufbau des Zahnschmelzes

Der Zahnschmelz ist die härteste Substanz des menschlichen Körpers, gleichzeitig aber auch sehr spröde. Er besteht zu 95 Gew.% aus anorganischem Hydroxylapatit, zu vier Gew.% aus Wasser und zu einem Gew.% aus organischen Verbindungen [121]. Die Apatitkristalle besitzen einen hexagonalen Querschnitt und sind von einer Hydrationschale aus Proteinen und Lipiden umgeben. In ihrer Form ähneln sie kleinen Stäbchen, die in sogenannten Schmelzprismen zusammengefügt sind. Innerhalb eines Prismas sind sie in unterschiedlichen Winkeln angeordnet. Die zentral liegenden Kristalle sind parallel zur Längsachse des Schmelzprismas ausgerichtet, weiter außen liegende Kristalle dagegen fächern sich auf und bilden einen zunehmenden Winkel zur Prismenlängsachse. Durch diese dreidimensionale Anordnung besitzen unterschiedliche Prismenbereiche unterschiedliche Säurelöslichkeiten, wodurch bei der Vorbehandlung mit Phosphorsäure eine vergrößerte Oberfläche mit einem mikroretentiven Schmelzätzmuster entsteht [88].

Schmelz-Komposit-Verbund

Buonocore verwendete seinerzeit eine 85%ige Phosphorsäurelösung. Es konnte aber nachgewiesen werden, dass eine 30–40%ige Orthophosphorsäure eine ideale Oberflächenmorphologie für die Adhäsivtechnik schafft. Bei niedrigeren Säurekonzentrationen kommt es zum Ausfall schwer löslichen Brushits, einem kristallinen Ausfallprodukt, was mit Wasser nicht entfernt werden kann und den Haftverbund negativ beeinflusst. Konzentrationen über 40% führen zur schnellen Präzipitation von Calciumphosphatverbindungen, die die Konditionierung des Schmelzes behindern [88].

Für eine suffiziente Verankerung von Komposit an präpariertem Zahnschmelz wird dieser für 15–30 Sekunden angeätzt. Nach dem Auftragen der Phosphorsäure muss diese gründlich abgespült werden, da auch bei 30–40%igen Präparaten in geringem Maße Präzipitate entstehen und Säurereste die Haftung negativ beeinflussen würden [88]. Durch die vergrößerte Oberfläche wird eine verbesserte Benetzbarkeit und eine gesteigerte Reaktionsfähigkeit der Schmelzstrukturen erreicht [88]. Dabei ist besonders auf eine vollständige Trockenhaltung der Zahnschmelzsubstanz zu achten, da eine Verunreinigung mit Speichel, Blut oder Sulkusflüssigkeit die Penetration des Haftvermittlers verhindert und eine Haftung unmöglich macht [26, 68].

Der danach aufgetragene Schmelzhaftvermittler ist ein niedrigvisköses, hydrophobes, ungefülltes Monomergemisch auf Bis-GMA-Basis. Durch Kapillarkräfte fließt er zwischen die Schmelzprismen der geätzten Oberfläche und bildet Zapfen (engl. „tags“) aus. Über diese entsteht eine mechanische Verankerung im Schmelz. Nach der Lichthärtung bildet der Haftvermittler die Befestigungsgrundlage für die Restauration. Bereits die durch die Schmelz-Ätz-Technik erreichte Schmelzhaftung ist ein wirksamer Antagonist zu den bei der Polymerisation des Komposits auftretenden Schrumpfkraften [66].

Die Anwendung von Phosphorsäure zur Schmelzätzung wird seit mehreren Jahrzehnten als klinisch unproblematisch gesehen [207]. Zudem wurden zahlreiche klinische Studien zur positiven Langzeitstabilität des Verbunds publiziert, sodass die Verankerung von Kompositen am Schmelz heute kein Problem mehr darstellt [66, 157].

2.1.3 Dentinhaftung

Aufbau des Dentins

Dentin ist ein vitales und im Vergleich zum Schmelz geringer mineralisiertes Gewebe. Es setzt sich zu 70 Gew.% aus anorganischem Material, 20 Gew.% organischem Material und 10 Gew.% Wasser zusammen. Der Hauptbestandteil der organischen Matrix besteht aus Kollagen und kollagenartigen Verbindungen [88]. Zusätzlich ist das Dentin von mit Liquor gefüllten Dentinkanälchen durchzogen, die für eine hydrophile Oberfläche sorgen. Die Zusammensetzung und Struktur des Dentins ist innerhalb eines Zahnes sehr variabel und wird durch Alterung, kariöse Prozesse und Remineralisation beeinflusst [119, 131, 153].

Dentin-Komposit-Verbund

Im Gegensatz zur Schmelzhaftung ist die Herstellung eines Haftverbundes zwischen Komposit und Dentin wesentlich schwieriger und technikintensiver. Bei der Präparation des Dentins bildet sich eine Schmierschicht (engl. „smear layer“) aus Dentintrümmern, Bakterien und Zellresten, die wie eine Isolationsschicht wirkt. Sie muss aufgelöst oder modifiziert werden, damit eine Verbindung des Komposits mit dem kompakten Dentin stattfinden kann. Die Entfernung der Schmierschicht kann entweder mit 30–40%iger Phosphorsäure oder einer sauren Monomerlösung erfolgen [66]. Des Weiteren muss eine Brücke zwischen der hydrophilen Dentinoberfläche und dem hydrophoben

Komposit geschaffen werden. Dies gelingt durch die Applikation eines amphiphilen Primers und eines Adhäsivs, was sich mit dem Komposit verbinden kann. Die Vorbehandlung der Dentinoberfläche gliedert sich also in drei Schritte:

Schritt 1: Entfernung / Modifizierung der Schmierschicht mit entweder

- a) Phosphorsäure (Etch&rinse-Technik) oder
- b) sauren Monomeren (Self-Etch-Primer)

Schritt 2: Priming des Kollagengeflechts mit einem amphiphilen Primer

Schritt 3: Stabilisierung des Kollagengeflechts mit einem Adhäsiv.

Diese Schritte werden im Folgenden genauer erläutert.

Schritt 1a: Konditionierung mit Phosphorsäure (Etch&rinse-Technik)

Die Dentinoberfläche wird hierbei gleichzeitig mit den Schmelzrändern konditioniert. Die Säure demineralisiert entlang der Dentintubuli in die Tiefe und legt das intertubuläre Kollagenetzwerk frei. Anschließend wird die Säure gründlich abgespült und dabei die gelösten Bestandteile als auch die Schmierschicht entfernt. Für das Dentin werden Ätzzeiten von 15–20 Sekunden empfohlen. Daher sollte die Säure zuerst auf die Schmelzareale appliziert werden, um eine Überätzung des Dentins zu vermeiden. Bei einer Überätzung würde auch in tieferen Schichten Kollagen freigelegt, welches möglicherweise nicht mehr vollständig mit den Haftvermittlern umflossen werden kann. Dies birgt die Gefahr einer verringerten Haftung und Schwächung des Dentin-Komposit-Verbundes [161]. Zur Kontrolle der Ätzung der Schmelzränder muss die Kavität getrocknet werden, wobei den freigelegten Kollagenfasern wichtige Feuchtigkeit entzogen wird. Dies führt zu einem Kollaps des Geflechts, wodurch eine Penetration mit den Haftvermittlern nicht mehr möglich ist. Es kommt zu nicht ausgefüllten Bereichen der interfibrillären Räume mit dem häufigen Auftreten postoperativer Hypersensitivitäten. Es wird daher eine Wiederbefeuchtung der Dentinbereiche nach der Ätzkontrolle empfohlen, damit die Kollagenfasern wieder aufquellen (wet-bonding). Dies gilt insbesondere für Haftvermittlersysteme auf Aceton- oder Alkoholbasis, da diese auf trockenem Dentin signifikant weniger wirksam sind [154–156, 202]. Wasserbasierte oder auch wasser- und alkoholbasierte Systeme sind für diese Problematik weniger anfällig, da sie durch das bereits enthaltene Wasser eine ausreichende Wiederbefeuchtung bewirken können [201].

Schritt 1b: Konditionierung mit sauren Monomeren (Self-Etch-Primer)

Bei dieser Methode zur Dentinkonditionierung werden dem Primer Säuren (z.B. Maleinsäure, Polyacrylsäure) beigemischt, sodass dieser das Dentin in der Oberfläche demineralisiert und die Schmierschicht auflöst. Bei selbstätzenden Primern ist die Tiefe der Demineralisation gleich der Tiefe der Infiltration, folglich kann kein unfiltriertes Kollagen zurückbleiben. Nach der Applikation und produktspezifischen Einwirkzeit wird die Lösung lediglich verblasen, um die enthaltenen Lösungsmittel zu verflüchtigen. Die gelösten Bestandteile des Dentins wie auch der Schmierschicht werden in den Haftverbund mit integriert [185]. Die Eindringtiefe der selbstätzenden Primer in die Dentintubuli ist deutlich geringer als die der Phosphorsäure (ca. 1 μm gegenüber 30 μm). Insgesamt zeigen diese Systeme gute Dentinhaftwerte, aber deutlich reduzierte Haftwerte im Schmelzbereich, die an eine Phosphorsäurekonditionierung nicht heranreichen. Eindeutiger Vorteil ist die Reduzierung postoperativer Hypersensitivitäten [68].

Schritt 2: Priming des Kollagengeflechts

Das Priming soll zu einer besseren Benetzbarkeit der Oberfläche mittels kurzkettiger, hydrophiler Monomere führen und das Kollagennetzwerk für die Aufnahme hydrophober Metacrylate vorbereiten. Zum Einsatz kommen wasserlösliche Mono- und Dimethacrylate, wie z.B. Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) oder Triethylenglycoldimethacrylat (TEGDMA), die die freigelegten Kollagenfibrillen umfließen und imprägnieren. Sie enthalten immer ein amphiphiles Molekül, welches sich sowohl an die hydrophilen Kollagenfasern als auch an hydrophobe Monomere binden kann [88].

Schritt 3: Stabilisierung des Kollagengeflechts mit einem Adhäsiv

Die vorbereitete Oberfläche wird im Anschluss mit einem Adhäsiv stabilisiert. Es enthält langkettige, amphiphile und gut vernetzende Monomere, die bis in den interfibrillären Raum des Kollagennetzwerkes eindringen und es durch Polymerisation verstärken. Sie dringen in die geöffneten Dentintubuli ein und versiegeln die Dentinoberfläche. Zudem wird eine mikromechanische Verankerung im Schmelzätzmuster erzeugt. Nach der Benetzung der Oberfläche wird diese mit einer Lichtquelle beleuchtet, wodurch die enthaltenen Monomere polymerisieren und das Adhäsiv aushärtet.

Das Adhäsiv bildet die eigentliche Verbindung zwischen dem hydrophilen, vorbehandelten Dentin und dem hydrophoben Komposit. Aus der vorbehandelten

Dentinoberfläche und dem Adhäsiv ist eine Hybridschicht entstanden, an die ein Komposit gebunden werden kann. Je nach Produkt ist die Applikation eines zusätzlichen Schmelzadhäsives notwendig [68, 88].

2.1.4 Anforderungen an Adhäsivsysteme

Heutige Adhäsivsysteme sollen einfach und schnell zu verarbeiten sein und gleichzeitig Haftkräfte garantieren, die den hohen Kaubelastungen standhalten. Hierbei das richtige Gleichgewicht zu finden, ist die Aufgabe der Hersteller. Der zahnärztliche Behandler muss in Anbetracht des vielfältigen Angebotes einen individuellen Kompromiss finden, der sowohl den klinischen Erfolg als auch die Verarbeitungszeit und Handhabung miteinbezieht.

Grundsätzlich werden folgende Anforderungen an Dentinadhäsive gestellt [179]:

- gute Biokompatibilität hinsichtlich des Pulpagewebes, der Schleimhäute sowie des Gesamtorganismus
- gute Benetzbarkeit der Zahnhartsubstanzen
- keine Hydrolyse der entstandenen Verbindungen
- hohe Soforthaftung an den Zahnhartsubstanzen, die den Kräften der Polymerisations-schrumpfung sicher entgegenwirken kann
- gute Haftung, auch unter mechanischer Belastung

Um diese Anforderungen zu erfüllen haben die Adhäsivsysteme in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte gemacht. Da es möglich wurde, Kunststoffe direkt mit der Zahnhartsubstanz zu verkleben, wurde die retentive und nicht substanzschonende Präparationsform, wie sie für Amalgamfüllungen notwendig ist, obligat [38]. Auch die anfänglich nur geringen Haftwerte haben sich im Laufe der Weiterentwicklung der Adhäsivsysteme stark verbessern können. Konnten in den Anfängen der Entwicklung geeigneter Adhäsive nur Werte von 2–12 MPa Scherhaftfestigkeit erreicht werden, sind mit den modernen Universaladhäsiven schon über 30 MPa möglich (Abb.1) [185].

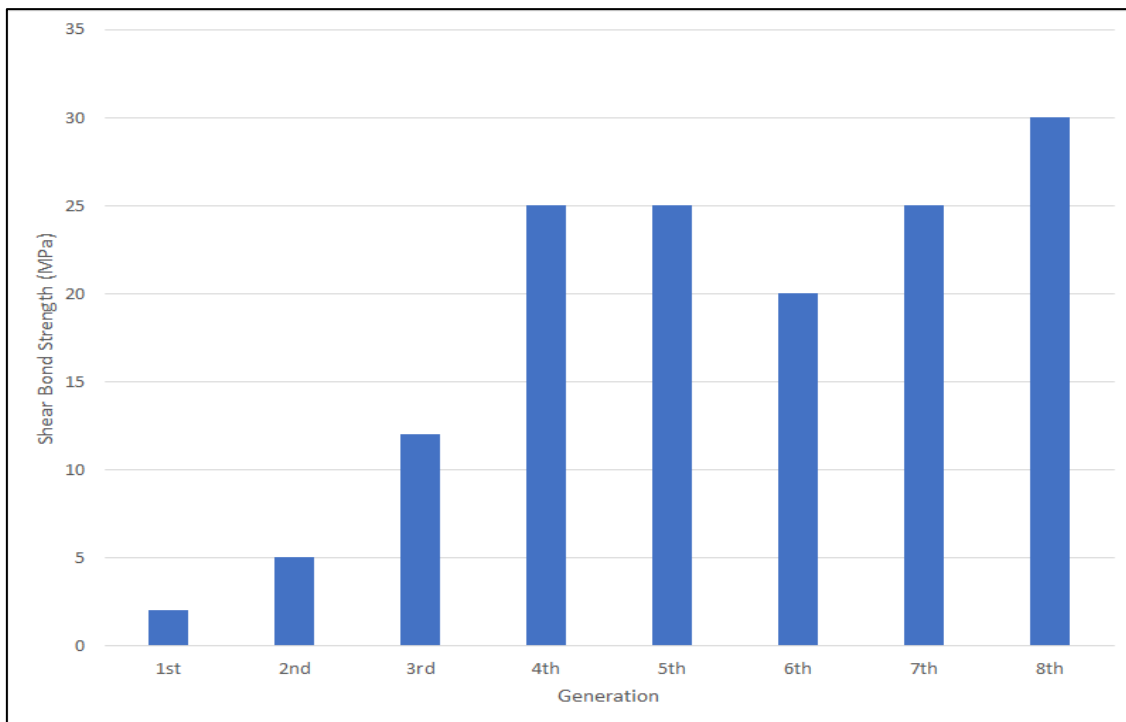


Abb. 1: Entwicklung der Scherhaftfestigkeit im Dentin verschiedener Generationen [185]

Van Meerbeek et al. [202] geben in einer aktuellen Übersichtsarbeit einen guten Einblick in die Welt der Dentinadhäsive und deren aktuellen Stand. Demnach kommt es bei der Anwendung eines stark sauren Self-Etch-Adhäsivs ($\text{pH} < 1$) bei zunehmender Liegedauer zu einer Destabilisierung der Grenzfläche im Dentin aufgrund ungenügender Infiltration in der Tiefe, wodurch nur reduzierte Dentinhaftwerte erreicht werden können. Im Schmelz zeigen sie allerdings dank ihrer hohen Ätzaggressivität akzeptable Haftwerte. Milde SE-Adhäsive ($\text{pH} \approx 2$) dagegen zeigen zuverlässige Haftwerte im Dentin, verlieren aber im Schmelz an Haftkraft. Als Goldstandard gilt aufgrund seiner zuverlässigen und klinisch in großer Zahl und über lange Zeiträume von bis zu 13 Jahren nachgewiesenen guten Performance Optibond FL [202].

De Munck et al. [138] konnten am Schmelz mit klassischen Adhäsivsystemen wie OptiBond FL beeindruckende Haftwerte von bis zu 49,5 MPa feststellen. Im gleichen Versuchsaufbau wurden für ein SE-Adhäsiv am Schmelz lediglich Haftwerte von 10,3 MPa gefunden. Im Dentin erreichte das Etch&rinse System 59,6 MPa, das SE-Adhäsiv lediglich 15,5 MPa. Diese Werte mögen Extreme darstellen, zeigen aber, welche großen Differenzen zwischen den Haftwerten einzelner Adhäsivsysteme liegen. Andere Autoren fanden ähnlich differierende Ergebnisse, Gorracci et al. [78] konnten für das Etch&rinse Adhäsiv

Excite (Ivoclar Vivadent) sowohl im Schmelz (42,92 MPa) als auch im Dentin (45,8MPa) sehr hohe Werte feststellen. Die in der Studie getesteten SE-Adhäsive erreichten dagegen geringere Werte von 22 bis 28 MPa. Grundsätzlich muss darauf hingewiesen werden, dass die in Studien eruierten Haftwerte sehr stark schwanken. Zahlreiche Studien konnten aber belegen, dass selbstätzende Adhäsive ohne zusätzliche Ätzung mit Phosphorsäure den klassischen Etch&rinse Zwei- oder Dreischrittssystemen, auch in Verbindung mit Universaladhäsiven, unterliegen (siehe auch Kap. 2.1.5) [29, 65, 70, 190].

In früheren Adhäsivgenerationen konnte zu starkes Trocknen nach dem Ätzvorgang zu einer verringerten Haftkraft und postoperativen Hypersensibilitäten führen [154]. Um dem zu entgehen, wurden wassergebundene Adhäsive entwickelt, die mit dem enthaltenen Wasser die Kollagenfibrillen wiederaufquellen lassen und so ein Über-trocknen verhindern [201, 206]. Auch ein Überätzen der Dentinoberfläche führt aufgrund der mangelnden Tiefenpenetration des Haftvermittlers zu Hypersensibilitäten. Diese Problematik wird mit den selbstätzenden Adhäsiven weitestgehend umgangen, da sie im gleichen Schritt die Dentinoberfläche demineralisieren und infiltrieren [67]. Inzwischen sind sogar selbstätzende Komposite verfügbar, die noch einen Schritt weiter gehen und die Adhäsivtechnik mit der gleichzeitigen Restaurierung einer Kavität verbinden. In-vitro-Studien zeigten bei ihnen gleichwertige oder leicht höhere Haftkräfte als bei Glasionomerkementen von lediglich $6,6 (\pm 1,97)$ MPa [163] und ein ähnliches Randspaltenverhalten [71]. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass frühere Adhäsivsysteme mitunter noch die besten Haftwerte generieren, aber sehr techniksensitiv sind und bereits kleine Anwendungsfehler zu großen Haftverlusten führen können. Dies konnte mit neueren Systemen vereinfacht werden, dennoch bleibt eine korrekte Anwendung für den klinischen Erfolg unabdingbar [185, 202].

2.1.5 Wertung unterschiedlicher Adhäsivsysteme

Zur Bewertung der Adhäsivsysteme muss zwischen der Schmelz- und der Dentinhaftung unterschieden werden. Im Schmelz können selbstätzende Adhäsive hinsichtlich der Haftwerte nicht mit den Systemen mit Phosphorsäureätzung mithalten, wie zahlreiche Publikationen belegen [62, 63, 69, 79, 149, 164, 172].

Im Dentin zeigen sich grundsätzlich geringere Haftwerte als im Schmelz, was auf Degradationsprozesse wie Hydrolyse oder enzymatischen Abbau zurückzuführen ist.

Diese laufen in Restaurationen ohne Schmelzätzung ungeschützt und dadurch deutlich schneller ab [72].

Self-Etch-Systeme gehen immer mit einer Verschlechterung der Effektivität einher [132]. Da mit den neuesten Universaladhäsiven die Unterschiede zu Etch&rinse-Systemen aber inzwischen marginal sind, können sie im Dentin bereits als eine Alternative zu den Mehr-Flaschen-Adhäsiven mit Phosphorsäureätzung gesehen werden [72]. Durch ein doppeltes Applizieren kann die Haftkraft von Universaladhäsiven verbessert werden, sodass sie in Kombination mit der Etch&rinse-Technik eine Vereinfachung der Anwendung mit nur sehr geringen bis keinen Haftungsverlusten darstellen [6]. In zwei klinischen Langzeitstudien konnten Peumans et al. [159, 160] sogar nachweisen, dass Self-Etch-Adhäsive selbst über neun Jahre mit einem Etch&rinse-System gleichwertige Ergebnisse zeigten. Es traten lediglich mehr Randverfärbungen auf, was die geringere Haftkraft der selbstätzenden Adhäsive im Schmelz bestätigt.

Ein Vorteil von Self-Etch-Adhäsiven liegt in ihrer einfacheren Handhabung und kürzeren Verarbeitungszeit. Da aber viele Präparate mehrfach aufgetragen werden müssen, relativiert sich der zeitliche Vorteil. Ein Überätzen der Zahnhartsubstanzen ist nicht möglich, da die Ätztiefe immer der Penetrationstiefe entspricht. Auch ein Kollabieren der Kollagenfasern durch übermäßiges Trocknen wird durch die Simultanätzung und Benetzung des Adhäsivs vermieden [64]. In Kombination mit einer selektiven Schmelzätzung können SE-Adhäsive eine deutlich gesteigerte Haftung im Schmelz erlangen. Wird im Zuge der Ätzung der Schmelzränder aber auch Dentin geätzt und danach ein konventionelles SE-Adhäsiv appliziert, kann eine drastisch verringerte der Haftkraft die Folge sein, was das Risiko für postoperative Hypersensibilitäten wieder stark erhöht [67].

Als Goldstandard für die Schmelz- und Dentinhaftung gelten nach wie vor Dreischritt-Systeme wie Syntac und Optibond FL [66, 139, 140]. Universaladhäsive haben sich in den letzten Jahren aber stark weiterentwickelt und das Niveau der Mehrflaschen-systeme fast erreicht [72]. Das Dilemma der SE-Adhäsive in Verbindung mit der selektiven Schmelzätzung konnte durch sie gelöst werden. Durch den Zusatz von MDP, welches eine chemische Haftung mit dem Dentin eingeht, ist ein stabiler Haftverbund möglich [67, 124]. Frankenberger et al. [71] zeigten in einer in-vitro-Studie, dass Universaladhäsive gute Randedichtigkeiten zeigen und daher das Credo, dass eine Vereinfachung immer zu Qualitätsverlusten führe, nicht mehr gehalten werden kann.

2.2 Kompositmaterialien

2.2.1 Entwicklung

Der Begriff „Komposit“ leitet sich vom Lateinischen „compositum“ (= Zusammengesetztes) ab und beschreibt die Zusammensetzung eines Stoffes aus mindestens zwei Komponenten. In der Zahnmedizin steht es für einen zahnfarbenen, plastischen Füllwerkstoff, bestehend aus einer organischen Harzmatrix, die durch anorganische Füllkörper verstärkt ist und chemisch oder durch Energiezufuhr aushärtet [121]. Der Wunsch nach zahnfarbenen Restaurationsmaterialien führte anfangs zur Verwendung von Kunststoffen auf Polymethylmethacrylatbasis (PMMA), die bei Mundtemperatur selbstständig aushärteten. Aufgrund von schlechten Materialeigenschaften, wie hoher Polymerisationsschrumpfung, geringer Härte oder pulpaschädigenden Inhaltsstoffen, konnten nur unbefriedigende Ergebnisse erreicht werden [88]. 1962 entwickelte Bowen ein deutlich verbessertes Füllungsmaterial. Er kombinierte ein Epoxidharz mit der Methylacrylsäure zu Bisphenol-A-Diglycidylmethacrylat (Bis-GMA) und vermischte es mit silanisiertem Quarzmehl [30, 88]. Dies bewirkte eine substantielle Verbesserung der physikalischen Eigenschaften, wie einer verringerten Expansion und Kontraktion sowie einer reduzierten Schrumpfung während des Aushärtens. Zudem war Bowens Komposit pulpa-verträglicher und härtete schneller aus [55, 180]. Durch die Einführung lichterhärtender Kompositmaterialien in den späten siebziger Jahren wurden die autopolymerisierenden Füllungskunststoffe zunehmend verdrängt.

Im Laufe des späten 20. Jahrhunderts folgte ein rasanter Weiterentwicklungsprozess, in dem die Zusammensetzung der Komposite weiter verfeinert und deren physikalischen Eigenschaften nochmals verbessert wurden [20]. Zunächst lag der Fokus auf der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Mittels innovativer Füllersysteme konnten die Abrasionsresistenz sowie die Politüreigenschaften optimiert werden, was zur Entwicklung von Mikrohybridkompositen führte [61]. Von der Mitte der 1990er-Jahre bis Mitte der 2000er Jahren war das Ziel, die noch hohe Polymerisationsschrumpfung von teilweise über 4% zu reduzieren. Diese führte zum häufigen Auftreten von postoperativen Hypersensitivitäten, einer verstärkten Höckerauslenkung und in der Folge zu Randspalten, was eine hohe Rate an Sekundärkaries nach sich zog und die Restaurationen am Ende scheitern lies [42, 127]. Bis dahin konnte das Schrumpfungsverhalten der

Komposite lediglich über die Inkrementeschichttechnik unter Berücksichtigung des C-Faktors (siehe Kap. 2.2.7) gesteuert werden [203]. 2003 kam mit QuiXfil der erste Bulk-Fill-Komposit auf den Markt, der eine Durchhärtung tieferer Schichtdicken von bis zu 4 mm erlaubte. Die bis dahin verfügbaren Inkrementkomposite hatten eine geringere Durchhärtungstiefe von maximal 2 mm [24]. Bulk-Fill-Komposite ermöglichten ein weniger zeitintensives Arbeiten, zunächst allerdings aufgrund der erhöhten Transluzenz mit ästhetischen und bedingt durch einen geringeren Fülleranteil auch materialtechnischen Einbußen.

Insgesamt betrachtet haben sich Kompositrestaurationen durch ihre guten klinischen Erfolge als Füllungs- und Aufbaumaterialien in der Zahnheilkunde bewährt und sind an die Stelle der Amalgamfüllungen gerückt [145, 208]. Dennoch zeigt eine Studie von Frankenberger et al. [71], dass Amalgamrestaurationen in ihrer Randqualität, dem Frakturverhalten und Verschleiß den Kompositen weit überlegen sind und gleichwertige Ergebnisse nur von Kompositen in Verbindung mit einem Universaladhäsiv annähernd erreicht werden können.

2.2.2 Zusammensetzung und Einteilung

Zahnärztliche Komposite setzen sich aus einer organischen Matrix, anorganischen Füllkörpern und silanisierten Haftvermittlern zusammen. Zusätzlich werden u.a. Initiatoren, Inhibitoren, Akzeleratoren und Farbpigmente beigefügt, durch die die Lagerfähigkeit, Verarbeitung und Farbgebung modifiziert werden [24].

Die Einteilung der Komposite anhand ihrer Füllkörper nach Lutz et al. von 1983 [125] (Tab. 2) ist noch geläufig, wird aber den heutigen Kompositen kaum gerecht, da es sich bei fast allen um Hybridkomposite handelt [167].

Tab. 2: Klassifikation der Komposite nach Lutz et al. [125]

Komposittyp	Füllerart und -material	Füllergröße in μm
Konventionelle Komposite	Makrofüller (Keramik, Quarz, Glas)	5-10
Mikrofüllerkomposite	Mikrofüller (feinstteiliges Siliziumdioxid)	
homogen	direkt beigefügte Mikrofüller	0,007-0,04
inhomogen	splitter- oder kugelförmige Vorpolymerisate und feinstteiliges Siliziumdioxid	100-200 0,01-0,04
Hybridkomposit	Mikro- und Makrofüller	0,01-0,04 je nach Komposit <1 bis 10

Stattdessen kann die Einteilung der Komposite anhand weiterer Kriterien erfolgen:

- klinische Anwendung (direkt / indirekt)
- Viskosität (hochviskös, modellierbar / niedrigviskös, fließfähig)
- Inkrementstärke / Durchhärtungstiefe (konventionelle Komposite: 2 mm Schichtstärke / Bulk-Fill-Komposite: bis zu 5 mm Schichtdicke)
- Polymerisationsmechanismen (chemisch härtend / lichthärtend / dualhärtend)

Durch die Weiterentwicklung der Füllkörper sind inzwischen auch Komposite mit Füllern im Nanometerbereich ($0,005\text{--}0,01\ \mu\text{m}$) auf dem Markt, die dementsprechend als Nanokomposite oder bei zusätzlicher Beimengung größerer Füllkörper als Nanohybridkomposite bezeichnet werden [24].

2.2.3 Organische Phase

Die organische Phase eines Komposits beinhaltet im nicht ausgehärteten Zustand Monomere, Initiatoren, Inhibitoren, Pigmente und weitere Additiva [121]. Der Hauptbestandteil besteht aus Monomeren. Meistens wird Bis-GMA oder das flexiblere Urethandimethacrylat (UDMA) verwendet. Da diese höhermolekularen Monomere alleine zu viskös sind, müssen kurzkettige Verdünnermonomere wie Triethylenglycoldimethacrylat (TEGDMA) beigemischt werden. So kann z.B. die Konversionsrate (Verhältnis der

verbleibenden Doppelbindungen im ausgehärteten Komposit zu der Gesamtzahl dieser Bindungen im unpolymerisierten Material) von Bis-GMA von 48% auf 70% erhöht und die chemische Resistenz und Festigkeit verbessert werden [95, 208]. Die Auswahl und das Mischverhältnis von Basis- und Verdünnermonomeren bestimmt im Wesentlichen die Werkstoffeigenschaften und das Reaktionsverhalten des Komposits [24, 95, 121]. Langkettige Monomermoleküle führen u.a. zu einer verbesserten Stabilität, aber auch zu einer erhöhten Viskosität. Kurzkettige Moleküle verbessern die Möglichkeiten der Verarbeitung, erhöhen aber auch die Polymerisationsschrumpfung. So gilt es, ein optimales Verhältnis von Monomeren zu Verdünnern zu finden, um die gewünschten Materialeigenschaften zu erreichen [95]. Asmussen und Peutzfeld [17] fanden heraus, dass durch unterschiedliche Mischungsverhältnisse von Bis-GMA / TEGDMA / UDMA die Zugfestigkeit, Biegefestigkeit und das Elastizitätsmodul zum Positiven verändert werden können.

Um eine Polymerisationsreaktion der Monomere (Umsetzen von Doppelbindungen in Einfachbindungen unter Bildung eines Polymers) in Gang zu setzen, sind Initiatoren notwendig. Durch chemische oder physikalische Aktivierung zerfallen diese in freie Radikale, welche mit den Doppelbindungen der Monomere reagieren und die Bildung von Polymerketten initiieren (Abb. 2).

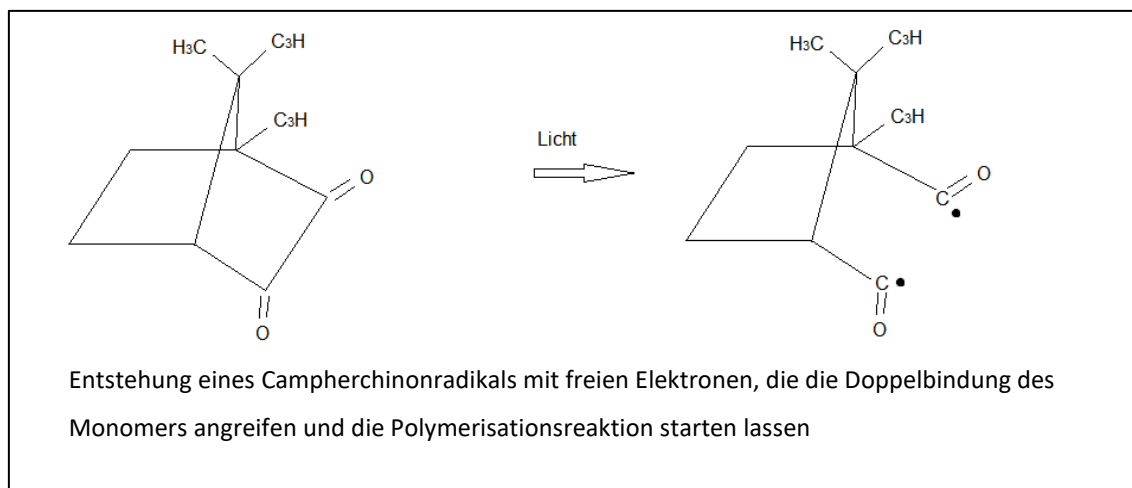


Abb. 2: Radikalbildung von Campherchinon

Bei rein lichthärtenden Kompositen, die mit sichtbarem, blauem Licht (Wellenlänge 400-470 nm) belichtet werden, kommt vorwiegend der Fotoinitiator Campherchinon zum Einsatz, der bei 465 nm sein Absorptionsmaximum hat [77]. Entscheidend für eine

vollständige Umsetzung der Monomere ist die Reaktionsfreudigkeit der Initiatoren. Je höher die Konversionsrate ist, desto besser sind auch die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Komposits [121].

Bei der Polymerisationsreaktion kommt es zwangsläufig zu einer Dimensionsänderung des Komposits. In der unpolymerisierten Matrix werden die einzelnen Monomereinheiten lediglich durch schwache elektrostatische Kräfte (van-der-Waals-Kräfte) zusammengehalten. Bei der Umwandlung in Polymerketten entstehen jedoch kovalente Bindungen, folglich rücken die Moleküle enger zusammen und das Volumen nimmt ab (Abb. 3) [77].

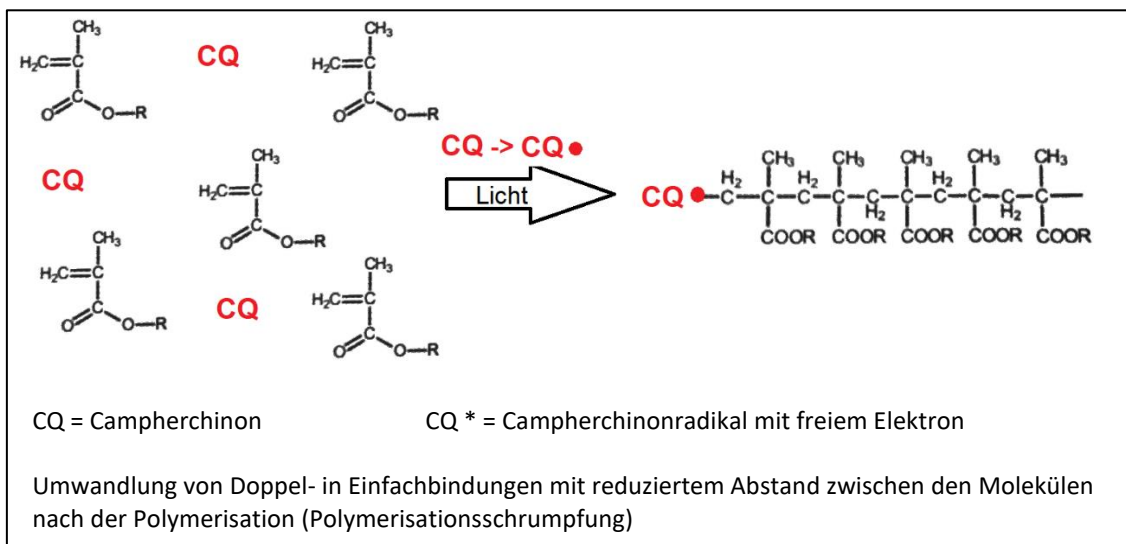


Abb. 3: Schematische Darstellung der Polymerbildung und Polymerisationsschrumpfung

Überschreiten die polymerisationsbedingten Schrumpfkraft die an den Kavitätswänden etablierten Haftwerte, entstehen Randspalten, welche in der Folge zu Randverfärbungen, postoperativen Hypersensitivitäten, Sekundärkaries sowie Zahn- und Füllungsfrakturen führen können [184, 193]. Zudem können sich die entstehenden Zugkräfte bei stabiler Haftung an der Zahnschubstanz auf die Zahnwände übertragen und zu Höckerdeformationen und -auslenkungen führen, was bei sehr hohen Schrumpfungswerten Schmelzrisse und Höckerfrakturen zur Folge hat [31, 152]. Die Polymerisationsschrumpfung wird daher auch heute noch als Hauptnachteil von Kompositen gesehen [104]. Das Ausmaß der Polymerisationsschrumpfung ist abhängig vom Füllstoffgehalt und der Matrixzusammensetzung [32], dem viskoelastischen Verhalten [33] und dem Umsatz der Doppelbindungen [52]. Bei modernen Kompositmaterialien erreicht die

Polymerisationsschrumpfung inzwischen Werte zwischen 0,7 und 2 Vol.% [141]. Dies ist eine starke Reduktion verglichen mit früheren Kompositen, die noch Schrumpfungswerte von 2,5–4 Vol.% aufwiesen [186].

Inhibitoren werden eingesetzt, um ein frühzeitiges Aushärten des Komposits zu verhindern und die Lagerfähigkeit zu erhöhen. Am häufigsten wird das sterische Phenol Hydrochinon eingesetzt, das durch Übertragung von Wasserstoffatomen freie Radikale abfängt. Allerdings verlängern sie auch die Polymerisationszeit, da für das Starten der Polymerisationsreaktion zuerst alle Inhibitoren aufgebraucht werden müssen [24, 77].

Um auch den ästhetischen Anforderungen an Kompositfüllungen gerecht zu werden, werden zusätzlich Pigmente und Farbstoffe beigelegt. Bewährt haben sich Eisen- und Aluminiumoxide, sowie Titandioxid [24].

2.2.4 Anorganische Phase

Die anorganische Phase eines Komposits besteht aus anorganischen Füllstoffen, die zentralen Einfluss auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften eines Komposits nehmen [77, 90]. Als Füllkörpermaterialien werden Gläser, Glaskeramiken, Silikate und Metalloxide verwendet. Ihre Größe beträgt zwischen 0,005 bis über 100 µm. Röntgenopazität wird durch die Beimengung von Barium- oder Strontiumoxid erreicht [90].

Durch die Zugabe von Füllstoffen wird der Anteil der organischen Matrix reduziert und die physikalischen Eigenschaften maßgeblich verbessert. So führt eine Zunahme der Füllkörperkonzentration u.a. zu einer Steigerung der Härte und des Elastizitätsmoduls [44], zu einer Reduzierung der Polymerisationsschrumpfung [120], aber auch zu einer Abnahme der Polierbarkeit und damit der Ästhetik [24]. Die genauen Veränderungen der physikalischen Eigenschaften hängen dabei nicht nur vom Füllergehalt, sondern auch von der Form und Größe der Füller ab. Kleine Füllkörper führen zu einer erhöhten Abrasionsfestigkeit, große Füllkörper zu einer besseren Biege- und Frakturfestigkeit [60, 114, 126].

2.2.5 Verbundphase

Für den festen Verbund zwischen Füllkörpern und organischer Matrix sorgen organofunktionelle Silane als Haftvermittler. Sie nehmen positiven Einfluss auf die

mechanischen Eigenschaften eines Komposits wie die Biegefestigkeit, Druckfestigkeit und Härte. Sie besitzen eine Silangruppe, die mit den freien Hydroxylgruppen der Füllkörperoberfläche reagiert, sowie eine Methacrylatgruppe, die mit den Kunststoffmonomeren eine Bindung eingeht [208]. Als Standardhaftvermittler dient in den meisten Kompositen 3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan (γ -MPS). Die Silanisierung der Füllkörper bewirkt eine Hydrophobierung der Oberfläche, was die Einlagerung in die organische Matrix vereinfacht und einen hohen Fülleranteil ermöglicht [24]. Ein fester Verbund zwischen Füllkörpern und Matrix beeinflusst das Bruch- und Verschleißverhalten positiv [126], denn eben dieser Verbund bildet eine Schwachstelle innerhalb der Kompositmatrix. Durch Hydrolyse kann er gelöst werden, in der Folge kommt es zum Verlust von Füllkörpern und zu einem höheren Materialverschleiß [88].

2.2.6 Polymerisationsmechanismen

Alle Komposite härten durch die Umwandlung der einzelnen Monomere in ein Polymer aus. Die dabei ablaufende Reaktion wird als radikalische Polymerisation bezeichnet und läuft unabhängig vom Werkstoff immer gleich ab. Einziges Unterscheidungsmerkmal liegt in der Art der Auslösung, welche durch unterschiedliche Initiatoren erfolgt. Je nach Initiatorensystem werden chemisch härtende oder lichthärtende Komposite unterschieden.

Chemisch härtende Komposite

Chemisch härtende Komposite bestehen aus zwei Pasten, in welchen sich unterschiedliche Komponenten zur Aktivierung befinden. Eine Paste enthält den Initiator Dibenzoylperoxid, was beim Vermischen mit der zweiten Paste durch einen Akzelerator (tertiäres Amin oder Trimethylbarbitursäure) aktiviert wird. Die dabei entstehenden Radikale starten die Abbindereaktion. Beim Anmischen der beiden Pasten können Luftblasen im Material verbleiben, welche als Poren sichtbar werden und zur Verfärbung des Komposits führen. Zusätzlich ist dadurch die Abrasionsfestigkeit reduziert [88]. Als weiterer Nachteil gilt der im Vergleich zu lichthärtenden Kompositen geringere Konversionsgrad. Dadurch verbleibende Restmonomere können zur Devitalisierung der Pulpa oder allergischen Reaktionen führen [168]. Tertiäre Amine als Akzelerator führen zu nicht farb-stabilen Kunststoffen, die sich in der Mundhöhle nach kurzer Zeit verfärben [28]. Der

Vorteil ist dagegen, dass das Material auch ohne weitere Energiezufuhr innerhalb von 4–5 Minuten vollständig aushärtet [88].

Lichthärtende Komposite

Bei den heute verwendeten lichthärtenden Kompositen kommt größtenteils das Diketone Campherchinon als Fotoinitiator zum Einsatz. Es besitzt sein Absorptionsmaximum bei 465 nm Wellenlänge und zerfällt dabei in Radikale [90]. Campherchinon ist ein vergleichsweise ineffizienter Initiator, da lediglich ein Radikal pro Molekül gebildet wird. Alternative Initiatoren wie Ivocerin (Ivoclar Vivadent) oder Phenylpropanedion können je nach Struktur zwei oder mehr Radikale bilden und sind damit deutlich effizienter [94].

Heute finden üblicherweise LED-Lampen mit einem Emissionsspektrum im blauen Wellenlängenbereich von 430–490 nm Anwendung. Das Emissionsspektrum der Lampe muss immer mit dem Absorptionsspektrum des verwendeten Initiatorsystems übereinstimmen, da verschiedene Fotoinitiatoren bei unterschiedlichen Wellenlängen zerfallen. Bei der Belichtung ist auf die Art der Lichtquelle mit der entsprechenden Lichtleistung, Lichtintensität und Bestrahlungsstärke, auf die Belichtungszeit, den Abstand zur Restauration, die Größe der zu bestrahlenden Oberfläche sowie auf die Zusammensetzung, Schichtdicke und Farbe des Komposits zu achten [27, 88]. Entscheidend für die Lichtpolymerisation ist, wie viel von der Lichtintensität an der zu belichtenden Oberfläche ankommt. Dies wird als Bestrahlungsstärke bezeichnet und ist abhängig vom Abstand zwischen Lichtquelle und Oberfläche, sowie von der Größe der belichteten Oberfläche (Abb. 4). Die Bestrahlungsstärke nimmt exponentiell mit der Entfernung ab, daher ist immer ein möglichst geringer Abstand zur Restauration zu wählen oder bei schlecht zugänglichen Kavitäten die Belichtungszeit zu verlängern [27]. Bei Anwendung der Schichttechnik muss unbedingt vermieden werden, die vom Hersteller angegebenen Schichtstärken zu überschreiten. Mit zunehmender Schichtdicke nimmt die Bestrahlungsstärke in der Tiefe ab, sodass es in tiefer gelegenen Schichten zu einer ungenügenden Bildung von Initiatorradikalen mit folglich ungehärteten Füllungsanteilen kommen kann [58]. Neben der Schichtdicke nimmt auch die Farbe eines Komposits Einfluss auf die Polymerisation. Dunklere und opakere Komposite haben geringere Durchhärtungstiefen und benötigen daher eine verlängerte Belichtungszeit [174].

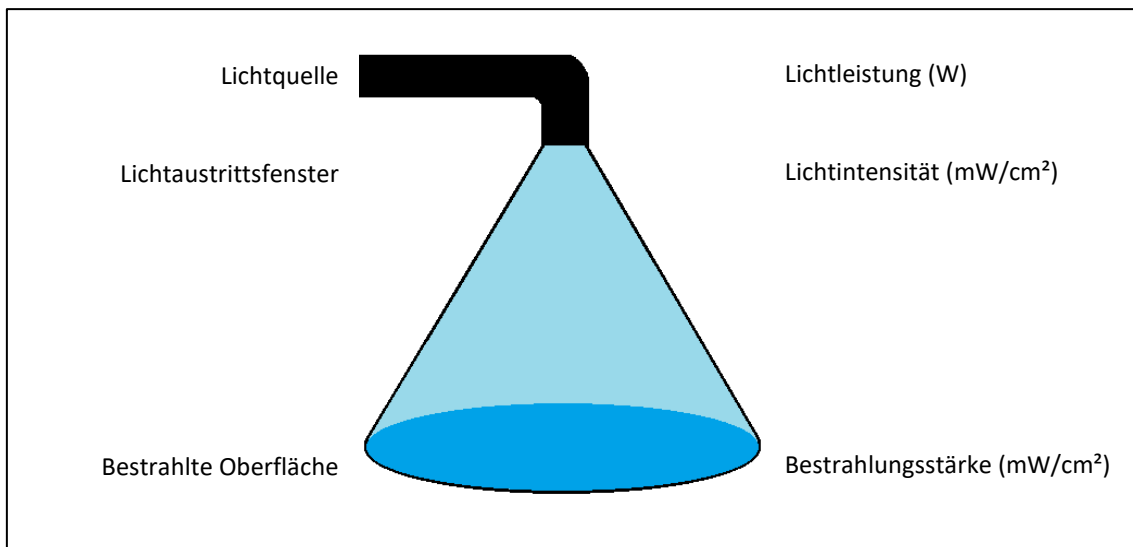


Abb. 4: Begriffe zur Lichthärtung

Lichthärtende Komposite dominieren heute eindeutig gegenüber den chemisch härtenden Kompositen, da sie wesentliche Vorteile wie eine längere Verarbeitungszeit, bessere Festigkeit, Farbstabilität und eine längere Lagerfähigkeiten besitzen [28].

2.2.7 Füllungskonzepte

Bei der Kompositapplikation werden unterschiedliche Füllungskonzepte verfolgt. Wichtige Faktoren, die bei der Auswahl der Technik eine Rolle spielen, sind u.a. die Reduktion der Polymerisationsspannungen, der Einfluss des Konfigurationsfaktors (C-Faktor), Zeit, Ästhetik, die Gestaltung der Füllungsoberfläche, die Kavitätenzugänglichkeit als auch die Kavitätenform.

Inkrementtechnik

Als Inkrementtechnik oder Schichttechnik wird das mehrmalige, schrittweise Applizieren von kleinen Kompositinkrementen (< 2 mm Schichtdicke) und separate Aushärten der einzelnen Schichten in der Kavität bezeichnet. Es werden dabei verschiedene Formen der Inkrementtechnik unterschieden (Abb. 5) [150].

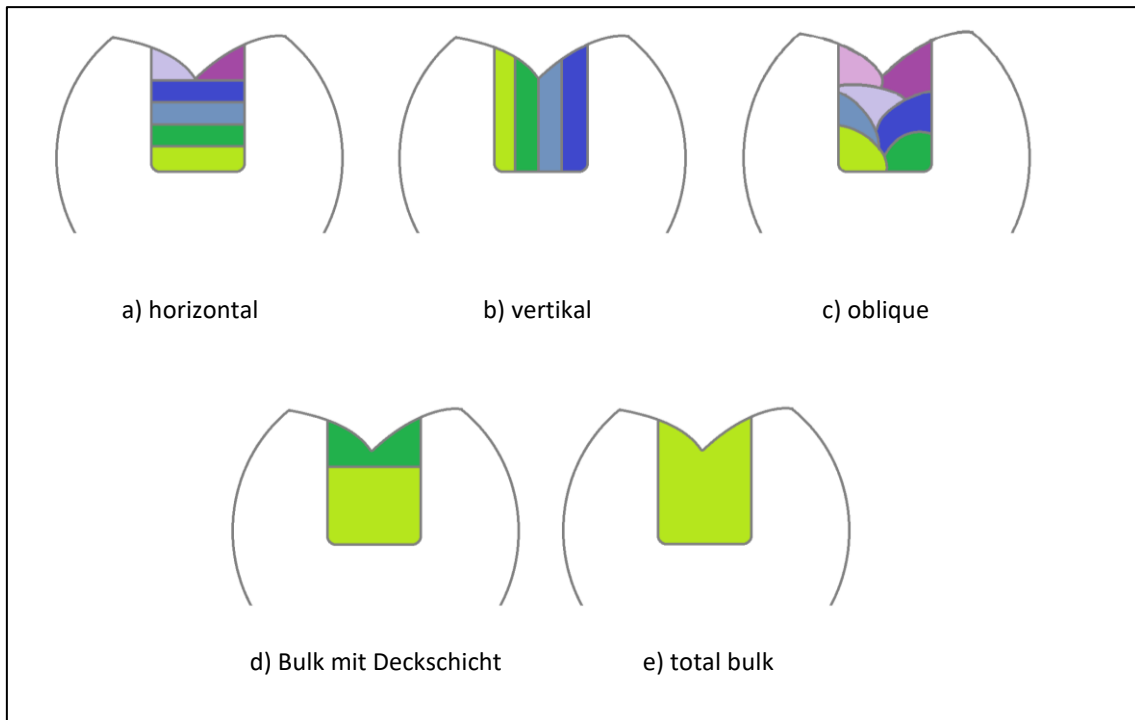


Abb. 5: Verschiedene Formen der Schichttechnik

Ziel dieser Technik ist es, Polymerisationsspannungen zu minimieren sowie eine vollständige Aushärtung in der Tiefe zu erreichen [88]. Besondere Bedeutung kommt dabei dem C-Faktor zu. Er beschreibt das Verhältnis von gebundener zu ungebundener Kompositoberfläche (Abb. 6). Je höher der C-Faktor, desto stärker sind die Kontraktionsspannungen und der Polymerisationsstress in der Kavität. Durch eine korrekt angewandte Schichttechnik kann der C-Faktor berücksichtigt und in der Folge der Polymerisationsstress reduziert werden [150], was zu einer Reduktion von Randspalten und den daraus folgenden unerwünschten Nebenwirkungen führt. Werden die Schichten so gelegt, dass ein niedriger C-Faktor vorliegt, schrumpft der Kunststoff an seiner ungebundenen Oberfläche und der Zahn-Kunststoffverbund gerät nicht unter Spannung. Zudem kann die Durchhärtung kontrolliert erfolgen, was die Konversionsrate positiv beeinflusst und sich positiv auf die mechanischen Eigenschaften und die Biokompatibilität auswirkt [191]. Entgegen der geläufigen Meinung fanden Versluis et al. [203] allerdings in einer Studie heraus, dass sich der Polymerisationsstress jeder ausgehärteten Schichten addieren und es so durch die Inkrementtechnik zu einem erhöhten Polymerisationsstress kommen kann.

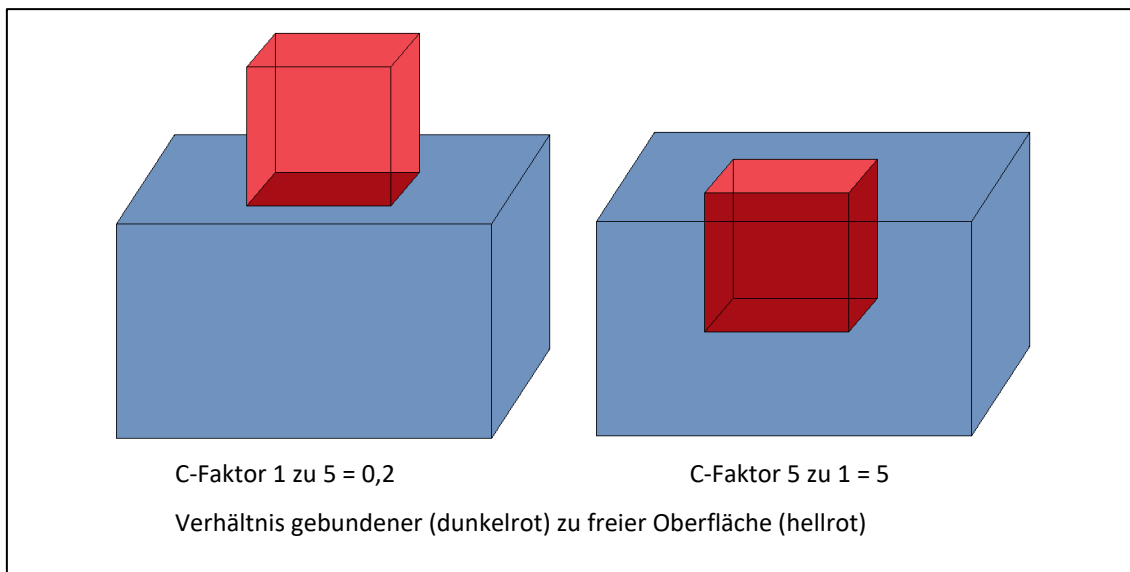


Abb. 6: Schematische Darstellung des C-Faktors

Als weiterer Vorteil der Inkrementkomposite ist deren hohes ästhetische Potential zu nennen. Viele Produkte sind in zahlreichen Dentin- und Schmelzfarben erhältlich und bieten so die Möglichkeit, individuell farbgeschichtete Füllungen zu modellieren.

Neben den genannten Vorteilen der Schichttechnik (kontrollierbare Härtung, Berücksichtigung des C-Faktors und Reduzierung der Schrumpfkraften) handelt es sich bei ihr allerdings um eine sehr zeitaufwendige und techniksensitive Methode. Es besteht ein hohes Kontaminationsrisiko während des Applizierens, Adaptierens und Aushärtens der einzelnen Schichten [177]. Besonders bei sehr engen und tiefen Kavitäten ist eine ausreichende Belichtung nicht immer sicher gewährleistet. Ebenso fällt es in diesem Fall schwer, die Inkremente suffizient zu platzieren und so eine optimale Adaption an die Kavitätenwände zu erreichen [60]. Da sehr viele Einzelschritte notwendig sind, potenziert sich die Gefahr von Fehlern wie Lufteinschlüssen oder ungenügender Trockenhaltung.

Insgesamt betrachtet handelt es sich um eine zeitaufwendige, techniksensitive, anfällige und schwierige Methode, die sich allerdings klinisch bewährt hat und auch heute noch als Goldstandard der Füllungstherapie gilt [166].

Bulk-Fill-Technik

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts erfolgte die Markteinführung der sogenannten Bulk-Fill-Komposite. Chemisch betrachtet stellen sie keine eigene Materialgruppe dar [99],

können aber in deutlich größeren Schichtstärken von 4–5 mm lichtpolymerisiert werden [14]. Durch das Applizieren weniger Schichten sollte das Fehlerpotential wie bei der Inkrementtechnik vermieden, der Füllungsprozess vereinfacht und zeitsparender gestaltet werden. Sie werden eingeteilt in niedrigvisköse (fließfähige) und hochvisköse (modellierbare) Bulk-Fill-Komposite.

Niedrigvisköse Bulk-Fill-Komposite haben einen reduzierten Füllkörperanteil und aufgrund dessen schlechtere mechanische Eigenschaften als hochvisköse Komposite. Da sie zudem weniger abrasionsfest sind, müssen sie mit einer 2 mm dicken Deckschicht aus einem hochviskösen Hybridkomposit abgedeckt werden. [100] Mit hochviskösen Bulk-Fill-Kompositen können Kavitäten in einem Zug ohne zusätzliche Deckfüllung restauriert werden, solange die maximale Schichtstärke gemäß den Herstellerangaben nicht überschritten wird [192].

Die gesteigerte Durchhärtungstiefe wird häufig durch eine erhöhte Transluzenz des Komposits erreicht, was aber mit Ästhetikeinbußen einhergehen kann [35]. Daher eignen sich Bulk-Fill-Komposite nicht zur Versorgung von Frontzahnrestorationen. Alternativ zur Steigerung der Transluzenz werden hochreaktive Fotoinitiatoren eingesetzt, die auch bei wenig Licht, wie es bei größeren Schichten am Kavitätenboden der Fall ist, eine ausreichende Polymerisation initiieren können [137]. Eine sichere und ausreichende Belichtung bekommt bei den Bulk-Fill-Kompositen eine enorm wichtige Bedeutung, da die Aushärtung nicht wie bei der Inkrementtechnik kontrolliert werden kann. Da es bei der Belichtung von dickeren Schichten aufgrund von Lichtabsorption und Streuungsphänomenen zu erheblichem Lichtintensitätsverlust am Kavitätenboden kommen kann, wird eine Belichtungszeit von mindestens 20 Sekunden [101], sowie die zusätzliche Belichtung von lingual und bukkal nach Matrizenentfernung empfohlen [84, 166].

Um die bei großen Schichten auftretenden hohen Schrumpfkkräfte zu reduzieren, wurden der organischen Matrix spezielle Monomerverbindungen, Polymerisationsmodulatoren respektive Schrumpfstress-Relaxatoren beigefügt [96]. Dadurch konnte die Polymerisationsschrumpfung der Bulk-Fill-Komposite um bis zu 70% reduziert werden [76]. Da bei der Bulk-Fill-Technik im Vergleich zur Schichttechnik der C-Faktor um ein Vielfaches erhöht ist, ist eine reduzierte Polymerisationsschrumpfung dort

immens wichtig. Heute weisen viele Bulk-Fill-Komposite eine gleich gute oder sogar geringere Polymerisationsschrumpfung auf als konventionelle Komposite [45, 123].

Bulk-Fill-Komposite sind bei der Versorgung enger und schwer zugänglicher Kavitäten als auch bei der Lining-Technik eine sinnvolle Bereicherung. Dabei werden schwer einsehbare Bereiche wie der Kavitätenboden mit einem dünnfließenden Liner ausgekleidet, um eine sichere Versiegelung zu garantieren und hohe Schrumpfkraften auf den Haftverbund zu reduzieren. Preusse et al. [165] konnte in einer aktuellen Studie nachweisen, dass bei Tunnelpräparationen (approximale Kariesentfernung unter Belassen der Randleiste) ein Lining mit einem dünnfließenden Versiegler zu signifikant besseren Randabschlüssen führte als mit der Inkrementtechnik.

Insgesamt zeigen sich innerhalb der Klasse der Bulk-Fill-Komposite große Unterschiede zwischen einzelnen Materialien hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, der maximalen Schichtstärken und der Belichtungszeiten. Daher ist bei der Anwendung zwingend auf die Herstellerangaben zu achten und klinisch wie materialtechnisch jedes Komposit einzeln zu bewerten.

2.2.8 Konventionelle und Bulk-Fill-Komposite im Vergleich

Seit der Einführung von Bulk-Fill-Kompositen wurden deren Eigenschaften mit denen herkömmlicher Komposite in zahlreichen in-vitro-Studien verglichen. Klinische Vergleichstest sind bisher meist über nur kurze Zeiträume verfügbar. Das Interesse an in-vivo-Langzeitstudien ist daher sehr hoch.

In-vitro-Studien

In-vitro-Studien konnten belegen, dass die Polymerisationsschrumpfung von Bulk-Fill-Kompositen gleich [1, 13] oder sogar reduziert ist im Vergleich zu konventionellen Kompositen [103, 175, 194]. Die Haftkraft zur Zahnschmelze war nicht verringert [2, 46]. Ilie et al. [98] kamen in einer in-vitro-Studie allerdings zu dem Schluss, dass das Adhäsivsystem den meisten Einfluss auf den Haftverbund hat und nicht das gewählte Komposit.

Hinsichtlich der Randadaptation zeigt die Bulk-Technik verglichen mit der Schichttechnik gleichwertige Resultate. Zahlreiche Studien belegten gleich gute Randabschlüsse [5, 9, 39, 74, 82, 105, 136, 171] oder sogar überlegende Randschließungen [8, 85, 106, 148, 158] von Bulk-Fill-Kompositen im Vergleich zu Inkrementkompositen. Auch

nach künstlicher Alterung zeigten Bulk-Fills bessere oder gleichwertige Ergebnisse bezüglich der marginalen Integrität [158, 181].

Gute mechanische Eigenschaften konnten insbesondere bei hochviskösen Bulk-Fill-Kompositen festgestellt werden. Sie zeigten eine höhere Härte gegenüber niedrigviskösen Bulk-Fills oder konventionellen Kompositen [3, 10, 11].

Durch die Reduktion der Polymerisationsschrumpfung und folglich des Polymerisationsstresses fällt die Höckerdeformation bei Bulk-Fill-Kompositen geringer aus [51, 57, 142, 183].

Insgesamt zeigen hochvisköse Bulk-Fill-Komposite bessere mechanische Eigenschaften [93, 100, 103, 112] als fließfähige oder konventionelle Komposite, wobei die niedrigviskösen Bulk-Fills mit einer Deckschicht aus Hybridkomposit überschichtet werden müssen, um gleichwertige Resultate zu erzielen.

In-vivo-Studien

Derzeit liegen nur vergleichsweise wenige klinische Studien vor, die die Anwendung von Bulk-Fill-Kompositen mit Inkrementkompositen vergleichen. Acht von dreizehn Studien untersuchten nur verhältnismäßig kurze Zeiträume von 12 bis 36 Monaten. Diese Studien legen nahe, dass Füllungen mit der Bulk-Technik bei Betrachtung nach modifizierten Kriterien des United States Public Health Service (USPHS) (u.a. Retention, Farb Anpassung, Randverfärbung, anatomische Form, Randanpassung, Sekundärkaries, postoperative Hypersensitivitäten, Oberflächentextur) keine signifikanten Unterschiede zur Inkrementtechnik zeigen und als gleichwertig zu sehen sind [21, 22, 47, 80, 146, 178, 195, 199, 205]. Oter et al. [146] beobachteten lediglich ein häufigeres Auftreten von postoperativen Hypersensitivitäten an Milchmolaren bei der Anwendung von Bulk-Fill-Kompositen. Yazici et al. [205] konnten eine Überlegenheit der Bulk-Fill-Komposite im Hinblick auf die marginale Anpassung feststellen.

Studien über längere Zeiträume wie fünf [197] und sechs Jahre [198] bestätigen die gute klinische Performance. Den längsten Zeitraum von über zehn Jahren untersuchten Heck et al. [86]. Verglichen wurde das Bulk-Fill-Komposit QuiXfil mit dem Hybridkomposit Tetric Ceram, wobei gezeigt werden konnte, dass selbst über diesen sehr langen Zeitraum keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich u.a. der Verlustrate, der

Entstehung von Sekundärkaries oder der Frakturen von Zahn- oder Füllungsanteilen bestanden.

Klarer Vorteil der Bulk-Fill-Komposite ist ihr geringer Zeitaufwand in der Verarbeitung, sodass sie sich auch in der Kinderzahnheilkunde optimal anbieten, da sie im Vergleich zu kompositverstärkten Glasionomerkementen deutlich bessere Resultate erzielen [21].

Obwohl Bulk-Fill-Komposite seit über zehn Jahren auf dem Markt verfügbar sind, ist die Zahl der klinischen Untersuchungen vergleichsweise gering. Arbildo-Vega et al. [15] kamen in einer aktuellen Meta-Studie aus 2020 zu dem Schluss, dass es zwischen Bulk-Fill- und konventionellen Kompositen in der klinischen Anwendung keinen Unterschied mehr gibt und Bulk-Fills eine adäquate Alternative zu konventionellen Kompositen darstellen. Sie können in vielen Bereichen, in denen die Schichttechnik an ihre Grenzen gerät, eine wertvolle Bereicherung sein. Weitere klinische Studien sind aber notwendig, um diese Einschätzung zu belegen.

2.3 Charakteristika der verwendeten Komposite

2.3.1 SonicFill

SonicFill nimmt bei den Bulk-Fill-Kompositen durch seine schallaktivierte Applikationsart eine Sonderstellung ein. Das SonicFill-System besteht aus aufschraubbaren Kapseln und einem eigens dafür entwickelten Handstück (Abb. 7). Die SonicFill-Kapseln werden in das Handstück eingeschraubt, dass auf die Turbinenkupplung des Behandlungsstuhls aufgesteckt wird (Abb. 9). Mittels des Fußanlassers oder dem Ringschalter am Handstück lässt sich die Intensität der Aktivierung und damit das Fließverhalten steuern (Abb. 8). Durch die Aktivierung mit Schallenergie während der Applikation wird das Komposit aktiviert, wodurch sich seine Viskosität um bis zu 84% reduziert (Abb. 11) [111]. Dadurch erhält es im Zuge der Applikation den Zustand eines fließfähigen Komposits, adaptiert sich selbstständig an die Kavitätenwände und fließt blasenfrei aus (Abb. 10). Vereinfacht wird die Applikation zusätzlich durch die mit herkömmlichen Kompositkapseln vergleichsweise kleinere Kapselöffnung (Abb. 7). Dies erleichtert die bodennahe Adaptation in engen und tiefen Kavitäten. Mit dem Ende der Aktivierung kehrt das SonicFill-Komposit in seinen ursprünglichen hochviskösen Zustand zurück und kann wie ein übliches Komposit modelliert werden. Durch diese Technik wird es mit einer einfachen,

zeitsparenden Handhabung mit vergleichsweise hoher Ästhetik und sehr guten mechanischen Eigenschaften beworben. Es vereine als einziges Komposit auf dem Markt die Verarbeitungsvorteile eines fließfähigen mit den guten physikalischen Eigenschaften eines hochviskösen Komposits [109].



Abb. 7: SonicFill-Handstück und Größenvergleich der Kapselöffnung mit einer Herculite-XRV-Ultra-Kompositkapsel

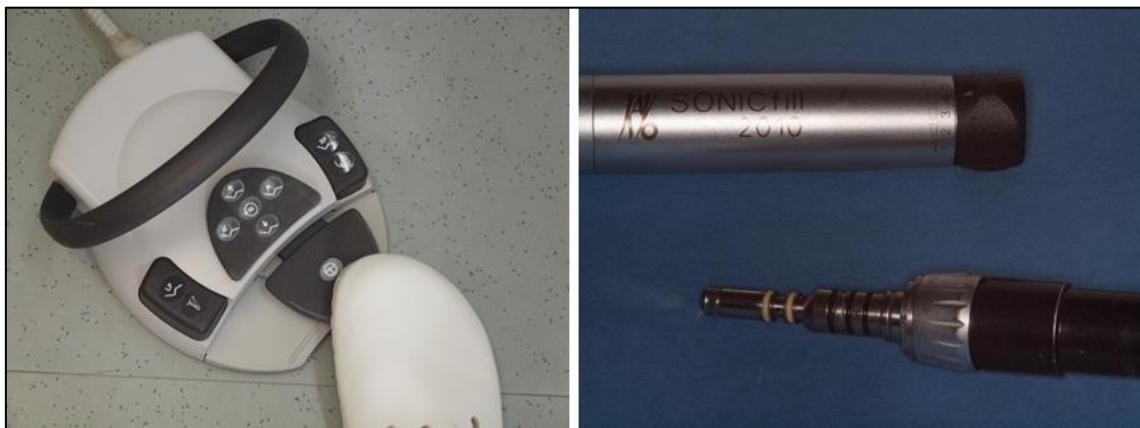


Abb. 8: Regelung der Intensität über den Fußanlasser oder den Ringschalter am Handstück

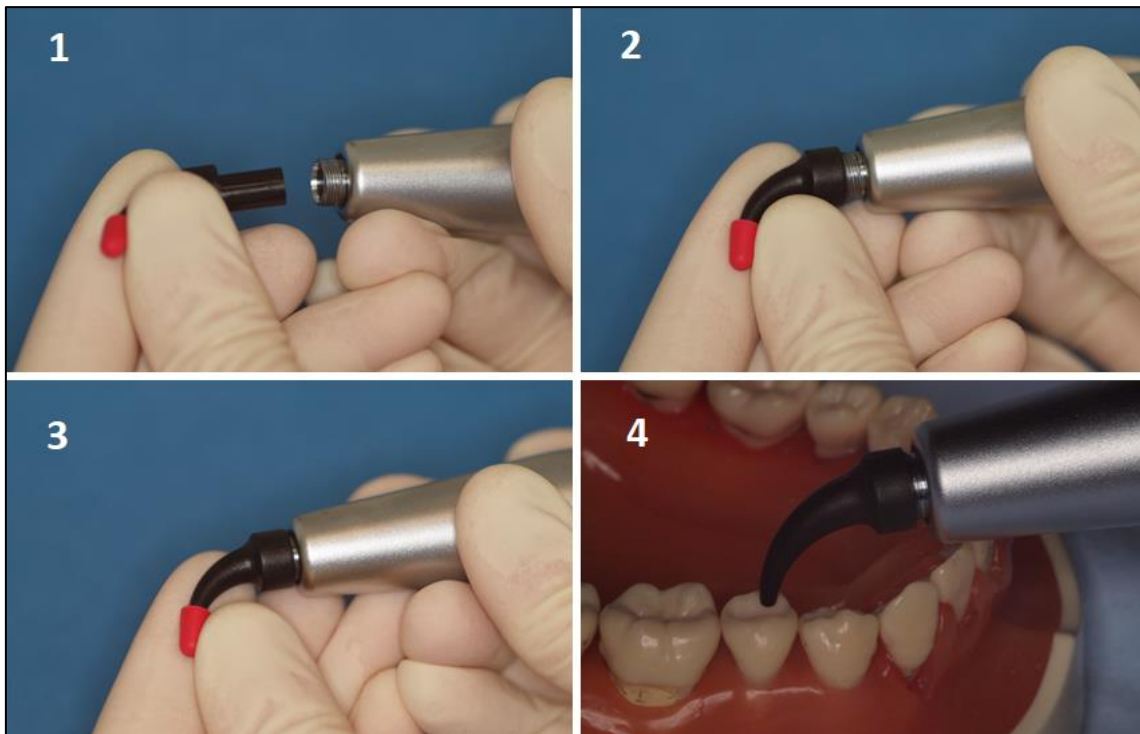


Abb. 9: Aufschrauben einer SonicFill-Kapsel auf das Handstück

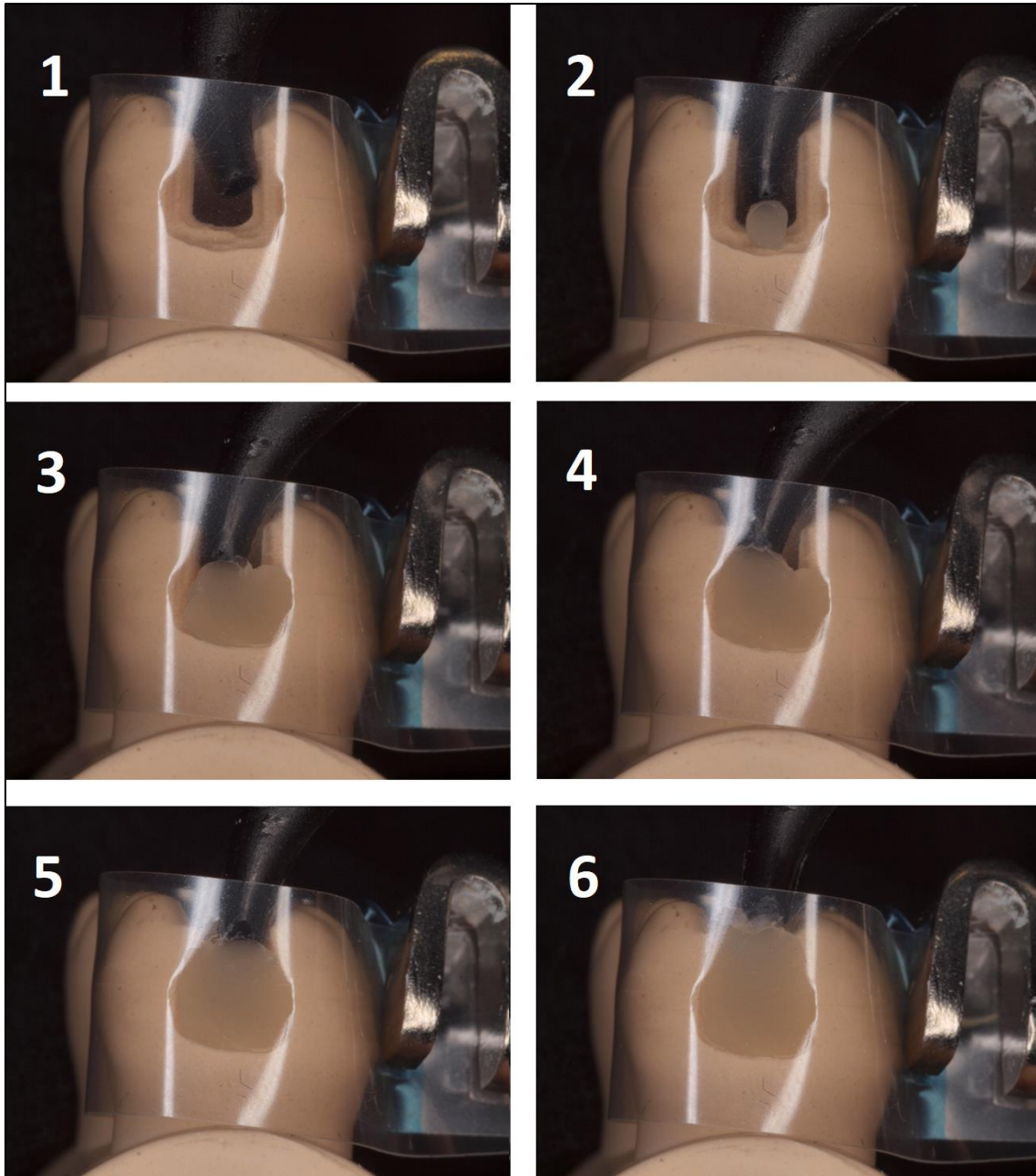


Abb. 10: Einbringen von Komposit mit dem SonicFill-System in der Bulk-Fill-Technik

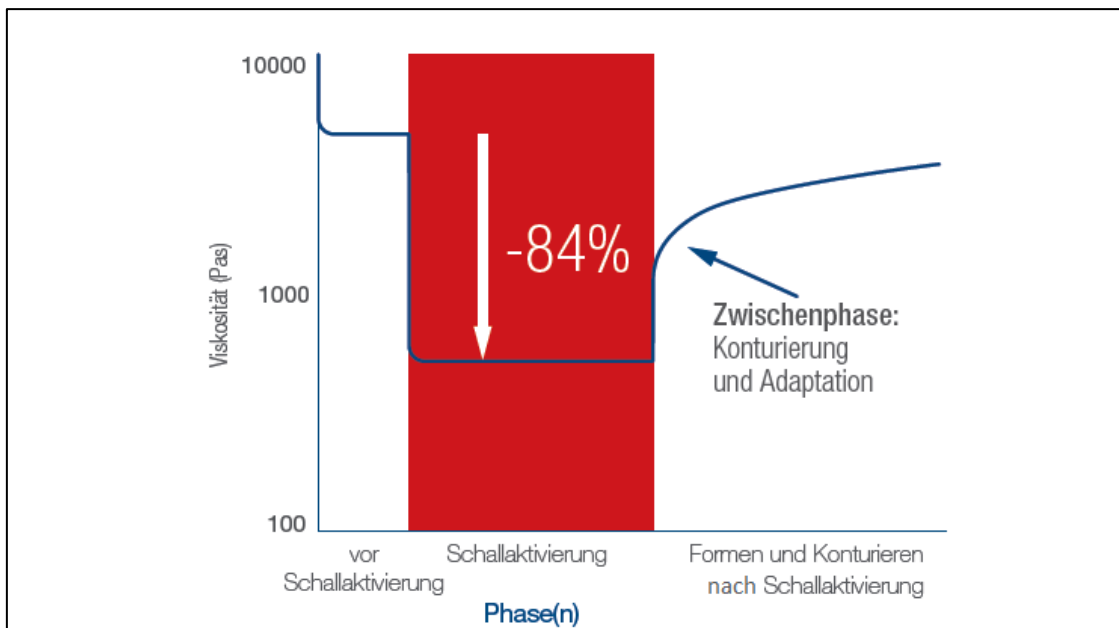


Abb. 11: Viskositätsänderung von SonicFill unter Schalleinwirkung (vereinfachte Darstellung) [111]

Die thixotrope Wirkung wird durch spezielle Modifikatoren ermöglicht, die der organischen Matrix beigefügt sind. Der Hauptbestandteil der organischen Matrix besteht aus Bis-GMA und TEGDMA. Mit einem Fülleranteil von 83,5 Gew.% zählt SonicFill zu den hochgefüllten Nanohybridkompositen. Es eignet sich für Seitenzahnrestaurationen wie auch Stumpfaufbauten und ist in vier verschiedenen Farbtönen erhältlich. Durch einen Brechungsindex und spezielle Härtemechanismen ist die Durchhärtungstiefe von SonicFill deutlich erhöht und kann daher in Schichten von bis zu 5 mm gehärtet werden.

Tab. 3 fasst die mechanischen Eigenschaften von SonicFill zusammen. (Quellenangaben: 1-4, 7 [111], 5 [76], 6 [3], 8 [189])

Tab. 3: Mechanische Eigenschaften und Inhaltsstoffe von SonicFill

	Mechanische Eigenschaften	SonicFill
1	Fülleranteil (Gew.%)	83,5 Gew.%
2	Biegefestigkeit (MPa)	185,8
3	Biegemodul (GPa)	12,9
4	Druckfestigkeit (MPa)	325
5	Volumenschrumpfung (%)	1,6
6	Härte (Vickers-Härte, N/mm ²)	78
7	max. Schichtstärke (mm)	5
8	Konversionsrate bei max. Schichtstärke (%)	83,5
<ul style="list-style-type: none"> • Inhaltsstoffe: Bis-GMA, TEGDMA, EBADMA • Füllstoffe: Siliciumdioxid, silanisiertes Ba-Al-B-Si-Glas, Zinkoxid, Titaniumdioxid 		

In zahlreichen experimentellen Studien wurden die mechanischen Eigenschaften von SonicFill mit anderen Bulk-Fill-Kompositen oder auch herkömmlichen Kompositen verglichen. Bei der Betrachtung der Randadaption konnte kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen einem konventionell geschichteten Komposit und SonicFill beobachtet werden [5, 9, 74, 82]. In einigen Studien konnte eine signifikant bessere Randadaptation von SonicFill-Füllungen gegenüber den konventionell geschichteten festgestellt werden [39, 75, 85, 103, 106, 158, 187].

Auch hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften zeigte SonicFill in einigen Studien gute Ergebnisse. Es besitzt eine verglichen mit Inkrementkompositen höhere Härte [3, 11, 14, 76], geringere Höckerdeformation [51, 57, 142], eine hohe Polymerisationstiefe [14, 79, 84], eine reduzierte Polymerisationsschrumpfung [76, 93] mit folglich niedrigeren Spannungs Kräften auf den Zahn-Komposit-Verbund [194], sowie geringe Frakturwerte [147] und Versagensraten [2].

Bisher wurden drei klinische Studien publiziert, die SonicFill mit einem herkömmlichen Komposit vergleichen [7, 18, 23]. Untersucht wurden Zeiträume von 12 und 24 Monaten. Dabei zeigten SonicFill und der Vergleichswerkstoff in allen Kategorien eine ähnliche klinische Leistung ohne statistische signifikante Unterschiede.

2.3.2 Herculite XRV Ultra

Herculite XRV Ultra zählt zu den hochviskösen Nanohybridkompositen und ist in 16 Schmelz- und neun Dentinfarben erhältlich. Es ist in Einzelkapseln als auch Spitzen erhältlich (Abb. 12 und 13). Die organische Matrix besteht aus Bis-GMA, Bis-EMA und TEG-DMA. Als Füllkörper werden vorpolymerisierte Füller (PPF), Siliziumdioxid-Nanofüller (20–50 nm) und Bariumglasfüller (0,4 µm) eingesetzt. Beworben wird Herculite XRV Ultra mit einer verbesserten Handhabung, Polierbarkeit und Abriebfestigkeit, sowie mit einer natürlichen Opaleszenz und Fluoreszenz. Dadurch eigne es sich besonders für ästhetische Restaurationen, aber auch für alle anderen Restaurationen der Black-Klassen I-V [108].



Abb. 12: Herculite XRV Ultra als Einzelkapseln [110]

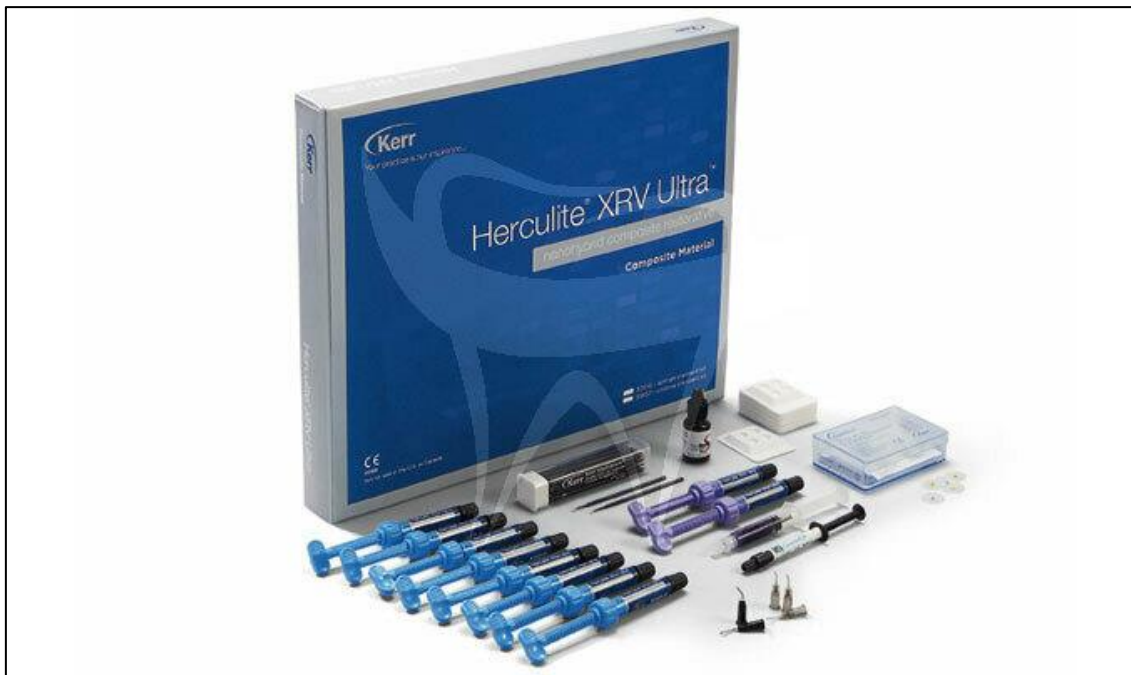


Abb. 13: Herculite XRV Ultra in Schmelz- und Dentinfarben in Spritzenapplikatoren [110]

Tab. 4 fasst die mechanischen Eigenschaften von Herculite XRV Ultra zusammen (Quellenangaben: 1-5, 7 [107], 6, 8 [102]).

Tab. 4: Mechanische Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Herculite XRV Ultra

	Mechanische Eigenschaften	Herculite XRV Ultra
1	Fülleranteil (Gew.%)	78 Gew.%
2	Biegefestigkeit (MPa)	135
3	Biegemodul (GPa)	9,4
4	Druckfestigkeit (MPa)	462
5	Volumenschrumpfung (%)	2,7
6	Härte (Vickers-Härte, kg/mm ²)	44,2
7	max. Schichtstärke (mm)	2
8	Konversionsrate bei max. Schichtstärke (%)	75,8
<ul style="list-style-type: none"> • Inhaltsstoffe: Bis-GMA, TEGDMA, Bis-EMA • Füllstoffe: PPF, Bariumglas, Siliciumdioxid Nanofiller 		

3 Fragestellung und Zielsetzung

Komposite sind aus dem zahnärztlichen Alltag nicht mehr wegzudenken. Es handelt sich bei der Anwendung der konventionellen Schichttechnik aber um eine sehr techniksensitive Methode, die ein hohes Fehlerpotential in sich birgt. Durch die Entwicklung der Bulk-Fill-Komposite sollte eine schnellere, einfachere, wirtschaftlichere und weniger fehleranfällige Methode etabliert werden, ohne Einbußen der Materialeigenschaften und bei gleichbleibender Qualität. Die wenigen bisher vorliegenden klinischen Studien konnten eine Gleichwertigkeit der Bulk-Fill-Komposite zeigen, allerdings nur über vergleichsweise kurze Zeiträume. Es bleibt daher zu klären, ob Restaurationen aus Bulk-Fill-Kompositen auch langfristig eine vergleichbare und sinnvolle Alternative zu den seit Jahren bewährten Materialien sind. In der vorliegenden Studie wurde das schallaktivierbare Bulk-Fill-Komposit SonicFill mit dem konventionellen Inkrementkomposit Herculite XRV Ultra anhand der 2010 von Hickel et al. [92] überarbeiteten klinischen Untersuchungskriterien der FDI nach neun Jahren nachuntersucht.

Nullhypothesen:

1. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen SonicFill und Herculite XRV Ultra hinsichtlich der Farbübereinstimmung und Transluzenz, auch wenn SonicFill transluzenter ist.
2. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen SonicFill und Herculite XRV Ultra hinsichtlich der Oberflächenqualität, obwohl sie einen unterschiedlichen Füllergehalt haben.
3. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen SonicFill und Herculite XRV Ultra hinsichtlich der Randqualität und Bildung von Sekundärkaries, obgleich es sich um zwei Materialien mit unterschiedlichem Schrumpfungsverhalten und unterschiedlicher Applikationstechnik handelt.
4. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen SonicFill und Herculite XRV Ultra hinsichtlich der Retention und dem Auftreten von postoperativen Hypersensibilitäten, da beide Materialien mit demselben Adhäsivsystem befestigt wurden.

4 Material und Methoden

4.1 Studiendesign

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine kontrollierte, klinisch-prospektive Langzeitstudie im Split-Mouth-Design. Die Vorgehensweise orientierte sich an den Vorgaben der FDI World Dental Federation [91].

4.2 Patientenauswahl

Die nachuntersuchten Füllungen wurden im Zeitraum von Juli bis September 2011 von drei erfahrenen Zahnärzten in zwei niedergelassenen Zahnarztpraxen gelegt. Insgesamt wurden bei 43 Patienten 118 Restaurationen, davon 54 mit Herculite XRV Ultra und 64 mit SonicFill, angefertigt. Bei jedem Patienten wurden beide Füllungsmaterialien verwendet, aber in unterschiedlichen Quadranten (Split-Mouth-Design).

Es galten dabei folgende Einschlusskriterien:

- Gesunder, erwachsener Patient (18–65 Jahre), Einverständnis des Patienten zur Studienteilnahme muss schriftlich vorliegen
- mehr als eine Füllung pro Patienten nötig
- Primärrestaurationen
- Beschwerdefreie Zähne
- Ausreichende Isolierung (Verhinderung der Kontamination) der Zähne zum Einbringen des Füllungsmaterials ist obligat
- Vitalitätsprüfung positiv, röntgenologischer Befund (auch der Nachbarzähne) unauffällig
- Mindestens zweiflächige Kavitäten mit Approximalkontakt
- Die zu versorgenden als auch die Nachbarzähne dürften parodontal nicht fragwürdig sein
- Gute Mundhygiene und Mundgesundheit
- Innerhalb von 12 Monaten nach Füllungslegung sollte keine umfangreiche zahnärztliche Versorgung geplant sein
- Auswahl ortsansässiger Patienten

Die Ausschlusskriterien waren:

- Zähne mit pathologischen Befunden
- Geplante prothetische Versorgung
- Parodontal fragwürdige Zähne, bzw. Zähne die sich in direkter Nachbarschaft zu eventuell nicht erhaltungswürdigen Zähnen befinden
- Keine ausreichende Isolierung (Verhinderung der Kontamination) möglich
- Wurzelkanalbehandelte bzw. marktote Zähne, sowie Zähne bei denen im Rahmen der Kariesexkavation die Pulpa eröffnet wird
- Patienten mit gnathologisch auffälligem Befund (Knirschen, Pressen)
- Kein angemessenes Interesse an der Mundhygiene
- Patienten mit bekannten Allergien gegen Inhaltsstoffe, systemischen Erkrankungen oder Vorliegen einer Schwangerschaft

4.3 Präparation und Füllungslegung

Um vergleichbare Füllungen zu erhalten wurden alle Behandler im Vorfeld genau über den vorgesehenen Behandlungsablauf aufgeklärt.

Die Kariesexkavation erfolgte mit hochtourigen Diamanten unter Wasserkühlung und niedertourigen Rosenbohrern ohne Wasserkühlung. Die Kontrolle der vollständigen Kariesentfernung wurde mittels einer Sonde (sondenhart, crie dentaire) durchgeführt. Bei der Kavitätenpräparation wurden die Schmelzränder nicht angeschrägt. Um eine Kontamination mit Speichel, Blut oder Sulkusflüssigkeit zu vermeiden wurden die zu füllenden Zähne mit Kofferdamgummi und -klammern vollständig trockengelegt. Zur Formgebung wurden Teilmatrizen verwendet, die mit einem Teilmatrizenring und Holzkeilen adaptiert wurden. Es folgte die Konditionierung der Zahnhartsubstanzen mit 37,5%iger Phosphorsäure (Gel Etchant, Kerr Italia S.r.l., Scafati (SA), Italien) in Etch&rinse-Technik (Schmelz 30 Sekunden, Dentin 15 Sekunden). Im Anschluss wurde die Phosphorsäure gründlich und vollständig für 15 Sekunden mit Wasser abgespült und die Kavität vorsichtig getrocknet. OptiBond FL Primer (Kerr Corporation, Orange (CA), USA) wurde für 15 Sekunden einmassiert und im Anschluss sanft für 5 Sekunden verblasen. Danach wurde eine dünne Schicht OptiBond FL Adhäsiv (Kerr Corporation, Orange (CA), USA) appliziert und verblasen. Es folgte die Belichtung mit einer LED-Polymerisationslampe für 20 Sekunden (Kerr Demi Plus, KerrHawe SA, Bioggio, Schweiz).

SonicFill (Kerr Corporation, Orange (CA), USA) wurde in einem einzigen Inkrement von maximal 5 mm (total bulk-fill) appliziert und für 40 Sekunden belichtet. Herculite XRV Ultra wurde in Inkrementen von 2 mm (konventionelle Schichttechnik) eingebracht und jede Schicht für 40 Sekunden lichtgehärtet. Im Anschluss folgte die Entfernung von Überschüssen sowie die Ausarbeitung, Okklusionskontrolle und Politur mit Sof-Lex-Scheiben (3M Deutschland GmbH, Seefeld, Germany), Occlubrush (KerrHawe SA, Bioggio, Schweiz) und Identoflex Komposit-Polierern (KerrHawe SA, Bioggio, Schweiz).

4.4 Bewertungskriterien und Dokumentation

Die Restaurationen wurden nach den in 2010 von Hickel et al. [92] überarbeiteten Kriterien der FDI World Dental Federation befundet. Es wurden dabei folgenden Kriterien untersucht:

- FDI 1: Oberflächenglanz
- FDI 2a: Oberflächenverfärbung
- FDI 2b: Randverfärbung
- FDI 3: Farbübereinstimmung und Transluzenz
- FDI 5: Fraktur von Material und Retention
- FDI 6a: marginale Randfraktur
- FDI 6b: Spalt
- FDI 6c: Randdefizite
- FDI 8: Approximalkontakte
- FDI 10: Patientensicht
- FDI 11: Postoperative Hypersensitivität und Vitalität
- FDI 12: Sekundärkaries
- FDI 13: Zahnintegrität
- Visual analog scale (VAS): subjektive Beschwerden bei Temperatur oder Aufbiss.

Die Untersuchung erfolgte anonymisiert wie auch verblindet und wurde schriftlich auf Untersuchungsbögen dokumentiert. Zusätzlich erfolgte eine Fotodokumentation.

Tab. 5 zeigt eine Übersicht über die FDI Untersuchungskriterien in den drei Hauptkategorien A: ästhetische Eigenschaften, B: funktionelle Eigenschaften und C: biologische Eigenschaften. Die in dieser Studie selektierten Untersuchungskriterien sind

fett hervorgehoben. Tab. 6 gibt eine Übersicht über die detaillierte Beschreibung der Einzelkriterien und deren Bewertungsformen in deutscher Übersetzung [92].

Tab. 5: Übersicht der FDI Kriterien

Hauptkategorien	Unterkategorien	Fünf-Stufen-Bewertung
A Ästhetische Eigenschaften	1 Oberflächenglanz und Poren	1 = Klinisch hervorragend / sehr gut
	2a Oberflächenverfärbung	2 = Klinisch gut (nach Korrektur sehr gut)
	2b Randverfärbung	3 = Klinisch ausreichend / befriedigend (kleinere Abweichungen, ohne nachteiligen Effekt, jedoch ohne Zahnschädigung behebbar)
	3 Farbübereinstimmung und Transluzenz	4 = Klinisch unbefriedigend (Reparatur erforderlich)
B Funktionelle Eigenschaften	4 Ästhetisch anatomische Form	5 = Klinisch ungenügend (Austausch erforderlich)
	5 Materialfraktur und Retention	
	6a Marginale Randfraktur	
	6b Randspalt	
	6c Randdefizit	
	7 Okklusale Kontur und Abnutzung	
	8a Approximalkontakt	
	8b Approximale Kontur	
	9 Radiologische Untersuchung	
	10 Patientensicht	
C Biologische Eigenschaften	11 Postoperative Hypersensitivitäten und Zahnvitalität	
	12 Sekundärkaries	
	13 Zahnintegrität	
	14 Parodontale Reaktion	
	15 Angrenzende Schleimhaut	
	16 Orale und generelle Gesundheit	

Tab. 6: Detaillierte Auflistung der untersuchten FDI-Einzelkriterien, in deutscher Übersetzung [92]

A Ästhetische Eigenschaften		
A 1	Oberflächenglanz und Poren	
	Score	Beschreibung
	1	Glanz, vergleichbar mit Schmelz
	2	(1) Etwas matt, unauffällig bei Sprechabstand (2) einige isolierte Poren
	3	(1) matte Oberfläche, aber akzeptabel, wenn mit Speichelfilm be- netzt (2) multiple Poren in mehr als einem Drittel der Füllungsoberfläche
	4	(1) raue Oberfläche, die nicht durch einen Speichelfilm maskiert werden kann. Einfache Politur ist nicht ausreichend, weitere Maß- nahmen sind notwendig. (2) Lufteinschlüsse
	5	Sehr rau, inakzeptable und plaqueretentive Füllungsoberfläche
A 2a	Oberflächenverfärbung	
	Score	Beschreibung
	1	Keine Oberflächenverfärbung
	2	Leichte Oberflächenverfärbung, einfach durch Politur zu beheben
	3	Mäßige Oberflächenverfärbung, die auch an anderen Zähnen vor- handen ist, nicht ästhetisch inakzeptabel
	4	Inakzeptable Oberflächenverfärbung der Restauration, größere Maßnahmen zur Verbesserung sind notwendig
	5	Starke oberflächliche und/oder tiefere Verfärbungen, generalisiert oder lokalisiert, für Maßnahmen nicht zugänglich
A 2b	Randverfärbung	
	Score	Beschreibung
	1	Keine Randverfärbung
	2	Leichte Randverfärbung, einfach durch Politur zu beheben
	3	Mäßige Randverfärbung, nicht ästhetisch inakzeptabel
	4	Deutliche Randverfärbung, größere Maßnahmen zur Verbesserung sind notwendig
	5	Tiefe Randverfärbungen, für Maßnahmen nicht zugänglich

A 3	Farbübereinstimmung und Transluzenz	
	Score	Beschreibung
	1	Gute Farbanpassung, kein Unterschied in Schattierung und/oder Transluzenz
	2	Leichte Abweichungen in Schattierung und/oder Transluzenz
	3	Deutliche aber akzeptable Abweichung, beeinträchtigt nicht die Ästhetik
	4	Lokalisierte klinische Abweichung, die durch eine Reparatur korrigiert werden kann
	5	Inakzeptabel, Erneuerung notwendig

B Funktionelle Eigenschaften

B 5	Materialfraktur und Retention	
	Score	Beschreibung
	1	Keine Fraktur oder Risse
	2	Kleine Haarrisse
	3	Zwei oder mehrere längere Haarrisse und/oder Materialabplatzungen, die die marginale Integrität oder den Approximalkontakt nicht beeinträchtigen
	4	Abplatzungen, die die marginale Integrität oder den Approximalkontakt beeinträchtigen oder Massenfraktur mit partiellem Füllungsverlust (weniger als die Hälfte der Restauration)
	5	Teilweiser oder vollständiger Füllungsverlust oder multiple Frakturen

B 6a	Marginale Randfraktur	
	Score	Beschreibung
	1	Harmonisches Bild, keine Spalten, weiße oder verfärbte Linien
	2	Kleine Randfraktur, durch Politur entfernbar
	3	Mehrere kleine Randfrakturen
	4	Mehrere Furchen oder Randfrakturen
	5	Generalisiert große Lücken oder Unregelmäßigkeiten

B 6b Randspalt		
	Score	Beschreibung
	1	Harmonisches Bild, keine Spalten, weiße oder verfärbte Linien
	2	Randspalt (<150µm), weiße Linien
	3	Spalt < 250µm, nicht entfernbar
	4	Spalt > 250µm oder Dentin liegt frei
	5	Restauration (ganz oder teilweise) locker aber in situ

B 6c Randdefizit		
	Score	Beschreibung
	1	Harmonisches Bild, keine Spalten, weiße oder verfärbte Linien
	2	Geringe Furchen, geringe Stufen/Grate, kleinere Unregelmäßigkeiten
	3	Größere Unregelmäßigkeiten, Furchen oder Grate, Stufen
	4	Größere Unregelmäßigkeiten oder Stufen, Reparatur notwendig
	5	Generalisiert große Lücken oder Unregelmäßigkeiten

B 8a Approximalkontakt		
	Score	Beschreibung
	1	Normaler Kontaktpunkt (Zahnseide oder 25µm dickes Metallblatt können passieren)
	2	Kontakt etwas zu stark aber ohne Nachteil (Zahnseide oder 25µm dickes Metallblatt können nur mit Druck passieren)
	3	Etwas schwacher Kontakt, kein Hinweis auf Beschädigungen des Zahnes, der Gingiva oder parodontaler Strukturen; 50µm dickes Metallblatt kann passieren
	4	Zu schwach und potentieller Schaden durch Speiseimpaktionen; 100µm dickes Metallblatt kann passieren
	5	Zu schwach und/oder klarer Schaden durch Speiseimpaktionen und/oder Schmerzen/Gingivitis

B 10	Patientensicht	
	Score	Beschreibung
	1	Vollkommen zufrieden mit Ästhetik und Funktion
	2	Zufrieden
	3	Geringfügige Kritik ohne nachteilige klinische Auswirkungen (1) an der Ästhetik (2) an der Funktion (3) am Behandlungsprozedere
	4	Wunsch nach Verbesserung (1) an der Ästhetik (2) an der Funktion
	5	Völlig unzufrieden und/oder nachteilige Auswirkungen, inklusive Schmerz

C	Biologische Eigenschaften
----------	----------------------------------

C 11	Postoperative Hypersensitivität und Zahnvitalität	
	Score	Beschreibung
	1	Keine Hypersensitivität, normale Vitalität
	2	Geringe Hypersensitivitäten für einen begrenzten Zeitraum, normale Vitalität
	3	Moderate Hypersensitivität, zeitlich verzögerte, geringe Sensibilität; keine subjektiven Beschwerden, kein Behandlungsbedarf
	4	Starke Hypersensitivitäten, verspätete Sensibilität mit leichten Symptomen oder klinisch keine Vitalität feststellbar; Behandlungsbedarf aber kein Austausch der Restauration notwendig.
	5	Starke, akute Pulpitis oder devitaler Zahn. Endodontische Behandlung ist notwendig und Restauration muss ersetzt werden.

C 12	Sekundärkaries	
	Score	Beschreibung
	1	Keine Sekundärkaries
	2	Kleine und lokalisierte Demineralisation, Erosion oder Abfraktion
	3	Größere Flächen von Demineralisation und/oder Erosion und/oder Abfraktion, kein freiliegendes Dentin. Nur präventive Maßnahmen notwendig
	4	Kavitierte Karies und vermutete unterminierende Karies und/oder Erosionen im Dentin und/oder Abrasion/Abfraktion im Dentin. Lokal begrenzt und zugänglich, kann repariert werden.
	5	Tiefe Karies oder freiliegendes Dentin, das für die Reparatur der Restauration nicht zugänglich ist.

C 13	Zahnintegrität	
	Score	Beschreibung
	1	Totale Unversehrtheit
	2	(1) Kleine, marginale Schmelzfraktur (< 150µm) (2) Haarrisse im Schmelz (< 150µm)
	3	(1) Schmelzdefekt (< 250µm) (2) Riss (< 250µm) (3) Schmelzchipping
	4	(1) Größere marginale Schmelzdefekte, Spalt > 250 µm oder Dentin freiliegend (2) Große Risse > 250 µm (3) Großes Schmelzchipping oder Wandfrakturen
	5	Höcker- oder Zahnfraktur

4.5 Ablauf der Nachuntersuchung

Alle Restaurationen waren bereits im Rahmen einer vorangegangenen Studie zu Baseline (T_0) und nach 12 Monaten (T_1) nachuntersucht worden. Diese Daten wurden in die statistische Auswertung mit eingebunden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine weitere Nachuntersuchung nach neun Jahren (± 1 Monat) (T_2) vorgenommen und wurde nicht durch einen der Behandler, sondern von einem unabhängigen Prüfer, dem Betreuer dieser Arbeit, durchgeführt. Die Doktorandin war für die Dokumentation der Ergebnisse sowie deren Auswertung zuständig.

Zum Untersuchungszeitpunkt T_2 konnten bei 23 Patienten 57 Restaurationen nachuntersucht werden, damit ergab sich eine Recallrate von 48,3 %. 20 Patienten waren verzogen, erklärten sich zur Teilnahme nicht bereit oder konnten telefonisch wie postalisch nicht erreicht werden. Die Untersuchungen wurden in den Praxen der Behandler durchgeführt.

Da zum Zeitpunkt der Füllungslegung die im Mai 2018 eingeführte Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) noch nicht bestand, wurde von jedem Patienten das Einverständnis zur Verwendung der personenbezogenen Daten im Rahmen medizinischer Forschung schriftlich eingeholt (siehe Kap. 9.3).

Im Januar 2020 breitete sich das neuartige Coronavirus SARS-CoV-2 in Deutschland zunehmend aus. Aufgrund der Corona-Pandemie wurden für die Untersuchung zusätzliche Schutzmaßnahmen ergriffen. Jeder Patient musste vor der Untersuchung einen Fragebogen zur Prävention vor COVID-19 ausfüllen (siehe Kap. 9.4). Zwei Patienten gaben dabei an, kürzlich an Versammlungen bzw. Besprechungen teilgenommen und daher engen Kontakt zu vielen unbekannten Personen gehabt zu haben. Die während der Untersuchung im Raum anwesenden Personen trugen daher in diesen Fällen einen FFP3-Mundschutz. Um größere Ansammlungen im Wartebereich zu vermeiden wurden die Patienten im 15-Minuten-Takt einbestellt. Ansonsten galten die in zahnärztlichen Praxen üblichen hohen Hygienestandards.

Zu Beginn der Untersuchung wurde der Patient gebeten für eine Minute mit einer chlorhexidinhaltigen Mundspüllösung zu spülen. Die Untersuchung erfolgte anonymisiert wie verblindet und wurde von einem erfahrenen Prüfer, dem Betreuer dieser Arbeit, durchgeführt. Zur Beurteilung wurden eine Sichtinspektion, das Trocknen der

Oberfläche mittels Multifunktionsspritze, sowie ein Abtasten mit der zahnärztlichen Sonde vorgenommen. Die Vitalitätsprobe erfolgte mit einem Schaumstoffpellet und Kältespray. Der Approximalkontakt wurde mit einem Toffelmire-Matrizenband (Dicke 0,038 mm) geprüft. Im Anschluss folgte die Fotodokumentation aller Restaurationen.

Drei Patienten konnten an den geplanten Untersuchungstagen nicht teilnehmen. Bei zweien lag eine aktuelle, hochwertige Fotodokumentation vor, welche zur Befundung herangezogen wurden. Ein Patient wurde von dem Behandler vor Ort nachuntersucht und die erhobenen Ergebnisse anhand der Fotodokumentation vom erfahrenen Prüfer nachkontrolliert.

4.6 Statistik

Die statistische Auswertung erfolgte mit SPSS (IBM, Chicago, IL, USA), statistische Einheit war der einzelne Zahn. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen wurden mit dem Mann-Whitney U-Test berechnet, Kalkulationen signifikanter Veränderungen über die Zeit erfolgten mit dem Friedman-Test auf einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$.

4.7 Ethikvotum

Die Studie wurde von der Ethikkommission der Philipps Universität Marburg am 21.10.2010 genehmigt (Aktenzeichen: Studie 134/10).

5 Ergebnisse

Zur Nachuntersuchung erschienen 23 Patienten (8 Männer, 15 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 48,9 Jahren. Dies entspricht einer Patientenrecallrate von 53,5 %. Von den im Jahre 2011 gelegten 118 Füllungen konnten im Rahmen der Nachuntersuchung 57 befundet werden, die Füllungsrecallrate betrug folglich 48,3 % (Tab. 7). Der durchschnittliche Nachuntersuchungszeitraum lag bei 109 Monaten (± 1 Monat), also 9 Jahren und einem Monat.

Tab. 7: Recallraten zu den Zeitpunkten T_0 und T_2

Material	Anzahl (n) / Recallrate (%)	T_0 (2011)	T_2 (2020)
HU	Anzahl	54	25
	Recallrate	100	46,3
SF	Anzahl	64	32
	Recallrate	100	50,0
Total	Anzahl	118	57
	Recallrate	100	48,3

Die Füllungen wurden im Split-Mouth-Design gelegt, d.h. jeder Patient erhielt Füllungen beider Werkstoffe, aber in unterschiedlichen Quadranten. Dabei wurden nach Möglichkeit für jedes Restaurationsmaterial gleiche Zahntypen gewählt. Lediglich in zwei Fällen wurden Prämolaren und Molaren bei demselben Patienten versorgt (Tab. 8).

Tab. 8: Verteilung der Restaurationen nach Zahntypen zum Zeitpunkt T₂

Material	OK Prämolare	UK Prämolare	OK Molare	UK Molare	Total
HU	11	4	3	7	25
SF	14	5	2	11	32
Total	25	9	5	18	57

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Nachuntersuchung im Detail dargestellt. Die gezeigten Tabellen und Abbildungen veranschaulichen die Ergebnisse der beiden Materialgruppen in prozentualer Verteilung.

5.1 Ergebnisse der ästhetischen Eigenschaften FDI 1–3

5.1.1 FDI 1: Oberflächenglanz und Poren

Oberflächenglanz

Hinsichtlich des Bewertungskriteriums FDI 1: Oberflächenglanz konnte zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Materialien ermittelt werden ($p>0,05$). Es war allerdings bei zunehmender Liegedauer eine signifikante Verschlechterung in beiden Gruppen zu beobachten ($p<0,05$).

Tab. 9: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 1: Oberflächenglanz zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

FDI 1: Oberflächenglanz		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T₀	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T₁	SF	50	48	2	0	0
	HU	56	44	0	0	0
T₂	SF	2	88	10	0	0
	HU	2	92	6	0	0

Tab. 10: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 1: Oberflächenglanz in beiden Materialgruppen

FDI 1: Oberflächenglanz		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T₀	100	0	0	0	0
	T₁	50	48	2	0	0
	T₂	2	88	10	0	0
Herculite XRV Ultra	T₀	100	0	0	0	0
	T₁	56	44	0	0	0
	T₂	2	92	6	0	0

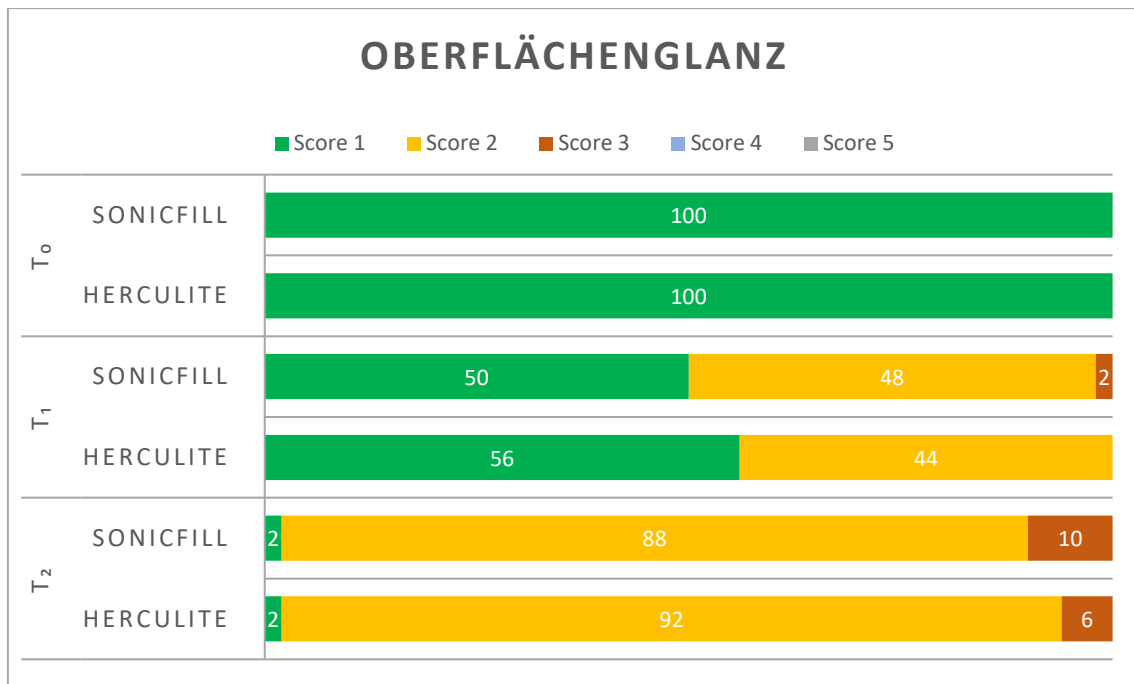


Abb. 14: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 1: Oberflächenglanz in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

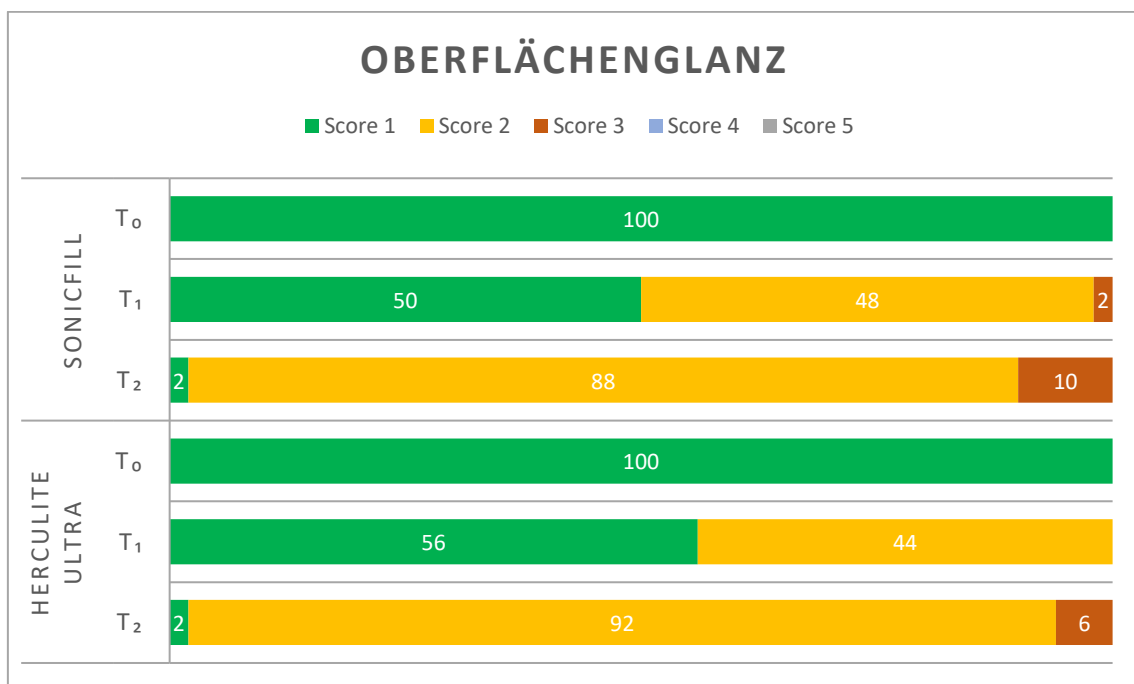


Abb. 15: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 1: Oberflächenglanz in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 16: FDI 1 (Oberflächenglanz), Score 1: Füllung an 18 mo (SF): Glanz vergleichbar mit Schmelz



Abb. 17: FDI 1 (Oberflächenglanz), Score 3.1: Füllung an 36 mod (SF) nach Trocknung: matte Oberfläche, aber akzeptabel, wenn mit Speichelfilm benetzt. Deutlich sichtbar ist die matte, trockene Oberfläche



Abb. 18: FDI 1 (Oberflächenglanz), Score 3.1: gleiche Restauration wie in Abb.17, akzeptabler Glanz nach Befeuchten der Oberfläche

Poren

Hinsichtlich der Beurteilung der Poren in der Oberfläche zeigte sich zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied zwischen den Materialien ($p > 0,05$). Allerdings war in beiden Materialgruppen eine statistisch signifikante Verschlechterung im Beobachtungszeitraum zu beobachten ($p < 0,05$).

Tab. 11: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 1: Poren zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

FDI 1: Poren		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T_0	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T_1	SF	80	15	5	0	0
	HU	80	20	0	0	0
T_2	SF	8	82	10	0	0
	HU	6	86	8	0	0

Tab. 12: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 1: Poren in beiden Materialgruppen

FDI 1: Poren		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	80	15	5	0	0
	T_2	8	82	10	0	0
Herculite XRV Ultra	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	80	20	0	0	0
	T_2	6	86	8	0	0

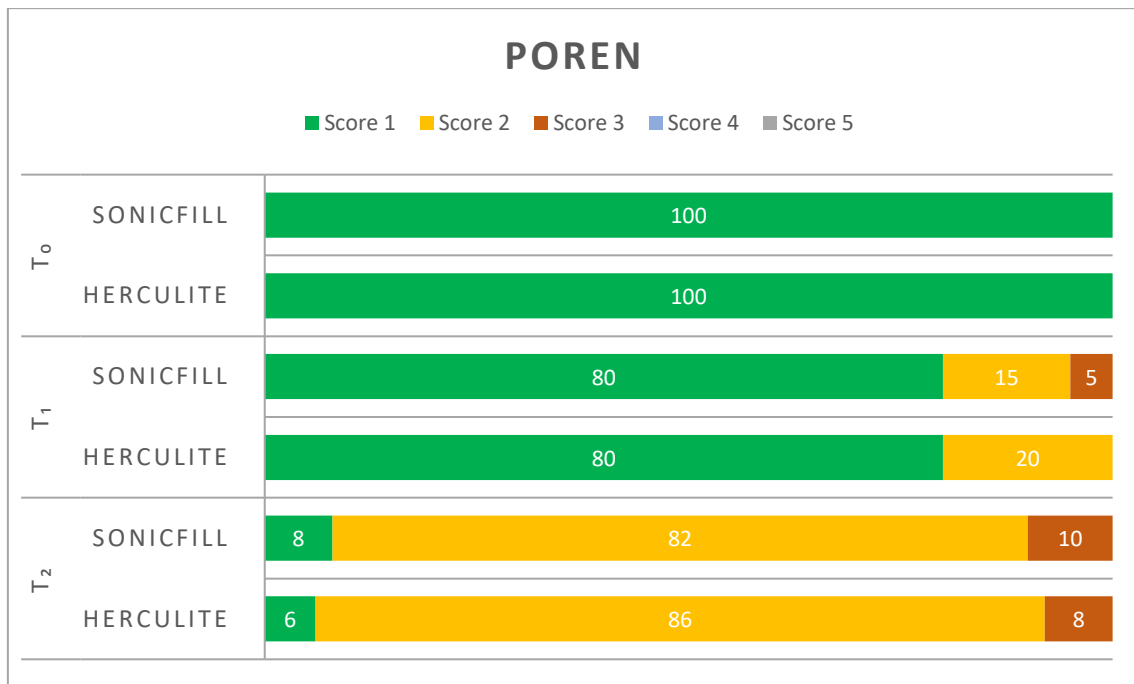


Abb. 19: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 1: Poren in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

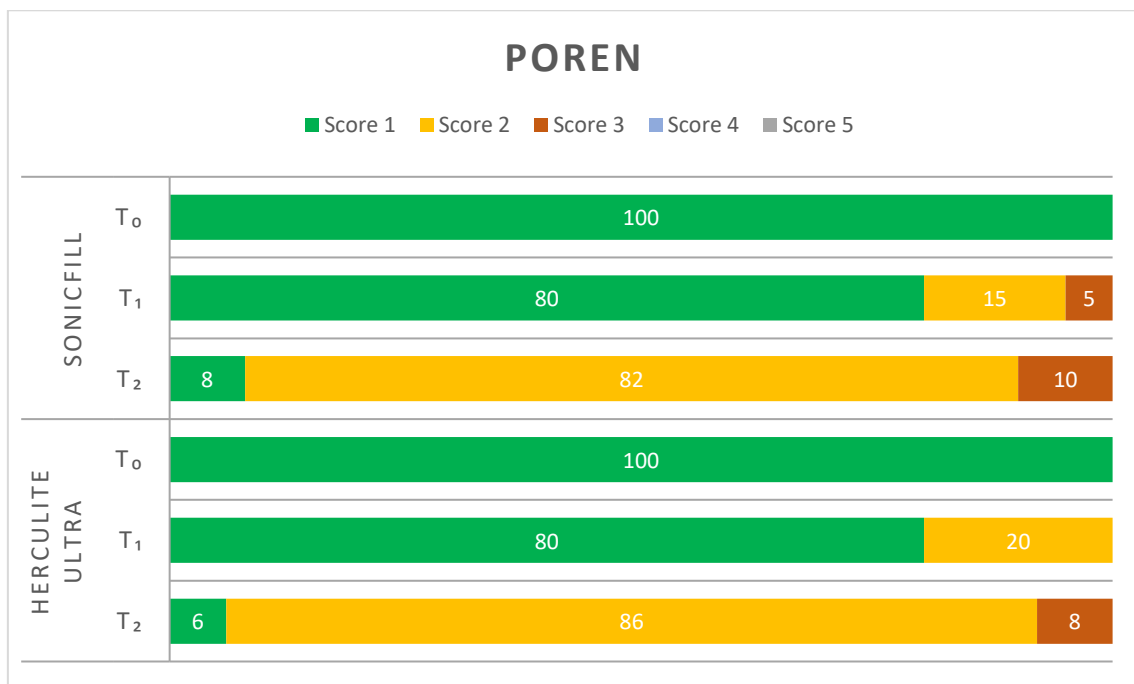


Abb. 20: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 1: Poren in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 21: FDI 1 (Poren), Score 1: Füllung an 35 od (HU): Glanz vergleichbar mit Schmelz

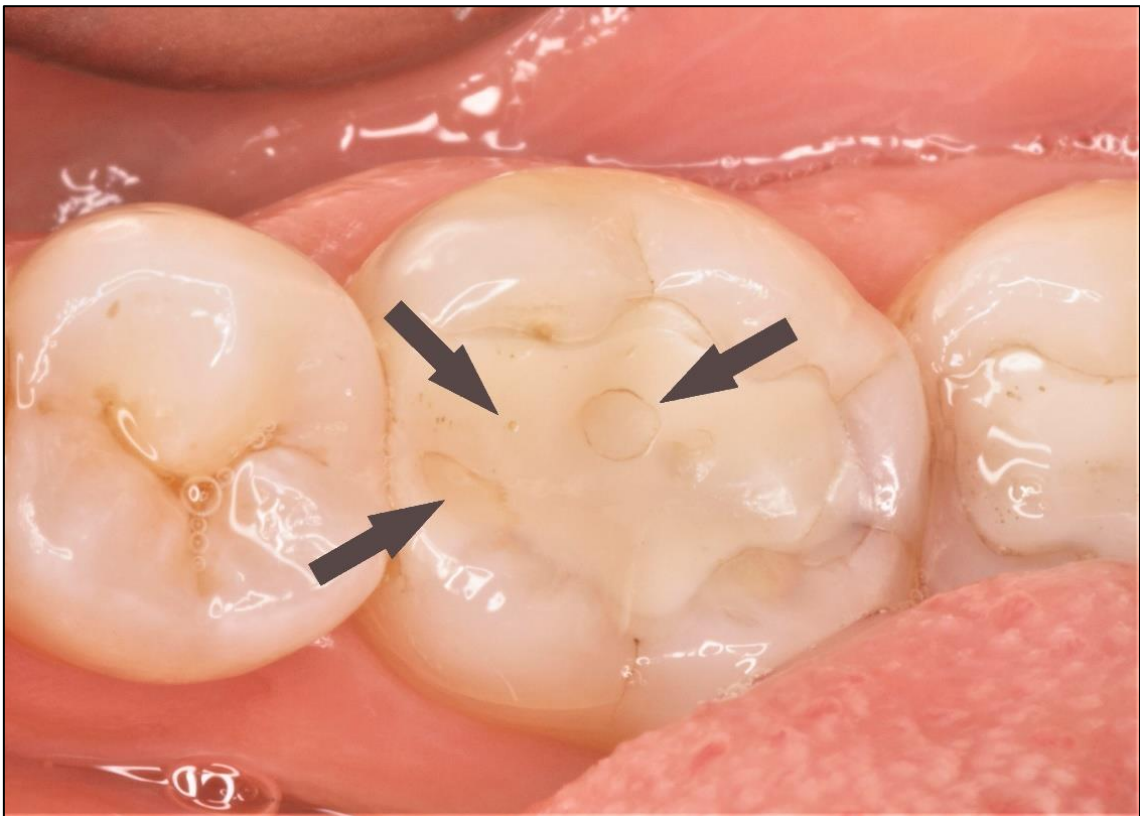


Abb. 22: FDI 1 (Poren), Score 3.1: Füllung an 46 mo (HU): multiple Poren in mehr als einem Drittel der Füllungsfläche

5.1.2 FDI 2a: Oberflächenverfärbung

Bei der Beurteilung des Untersuchungskriteriums FDI 2a: Oberflächenverfärbung zeigte SonicFill zum Zeitpunkt T_2 ein statistisch signifikant besseres Ergebnis als Herculite XRV Ultra ($p < 0,05$). Über den gesamten Beobachtungszeitraum war bei beiden Materialien eine signifikante Verschlechterung festzustellen ($p < 0,05$).

Tab. 13: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 2a: Oberflächenverfärbung zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

FDI 2a: Oberflächenverfärbung		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T_0	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T_1	SF	90	10	0	0	0
	HU	90	10	0	0	0
T_2	SF	60	40	0	0	0
	HU	24	76	0	0	0

Tab. 14: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 2a: Oberflächenverfärbung in beiden Materialgruppen

FDI 2a: Oberflächenverfärbung		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	90	10	0	0	0
	T_2	60	40	0	0	0
Herculite XRV Ultra	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	90	10	0	0	0
	T_2	24	76	0	0	0

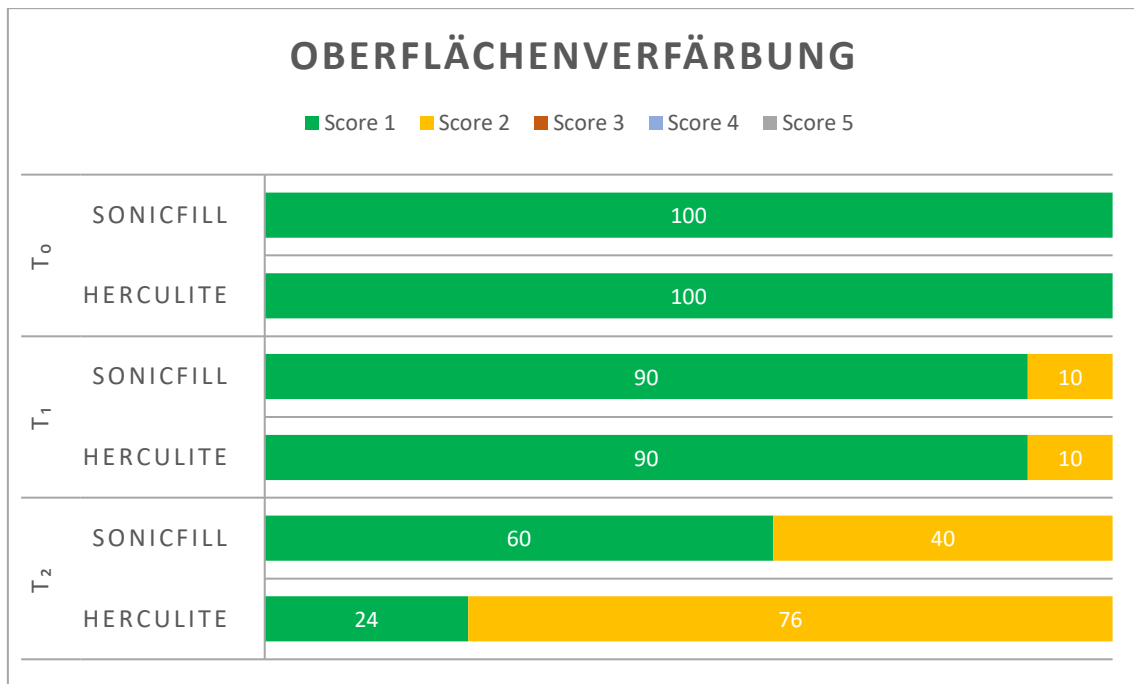


Abb. 23: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 2a: Oberflächenverfärbung in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

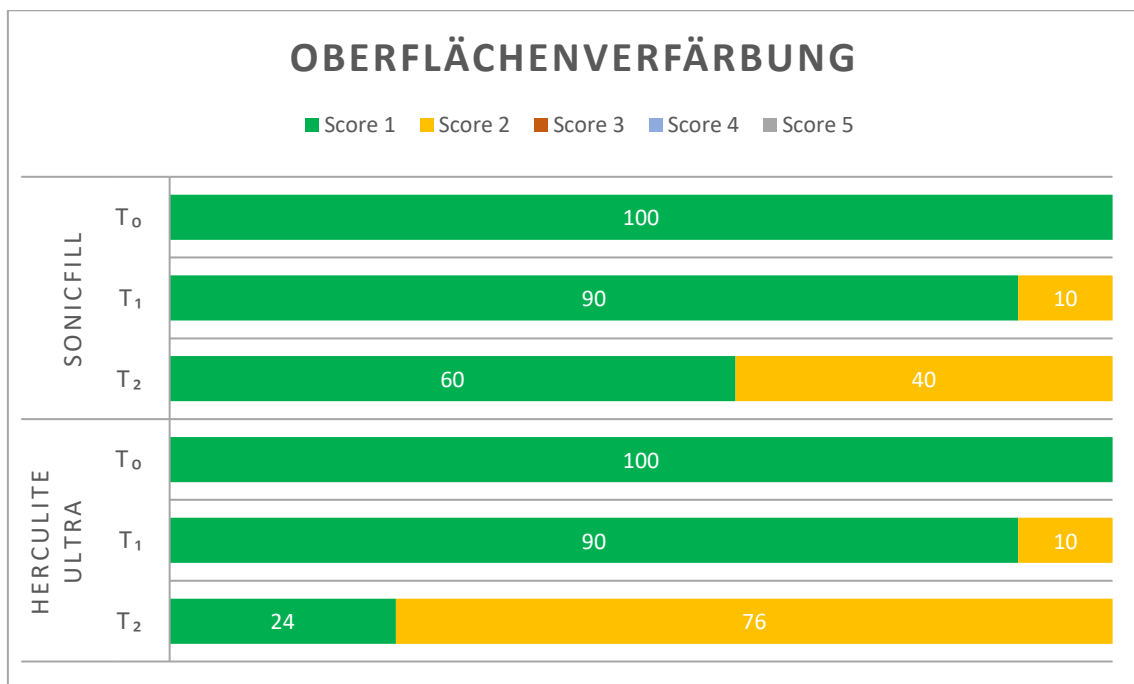


Abb. 24: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 2a: Oberflächenverfärbung in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 25: FDI 2a, Score 1: Füllung an 24 od (HU): keine Oberflächenverfärbung

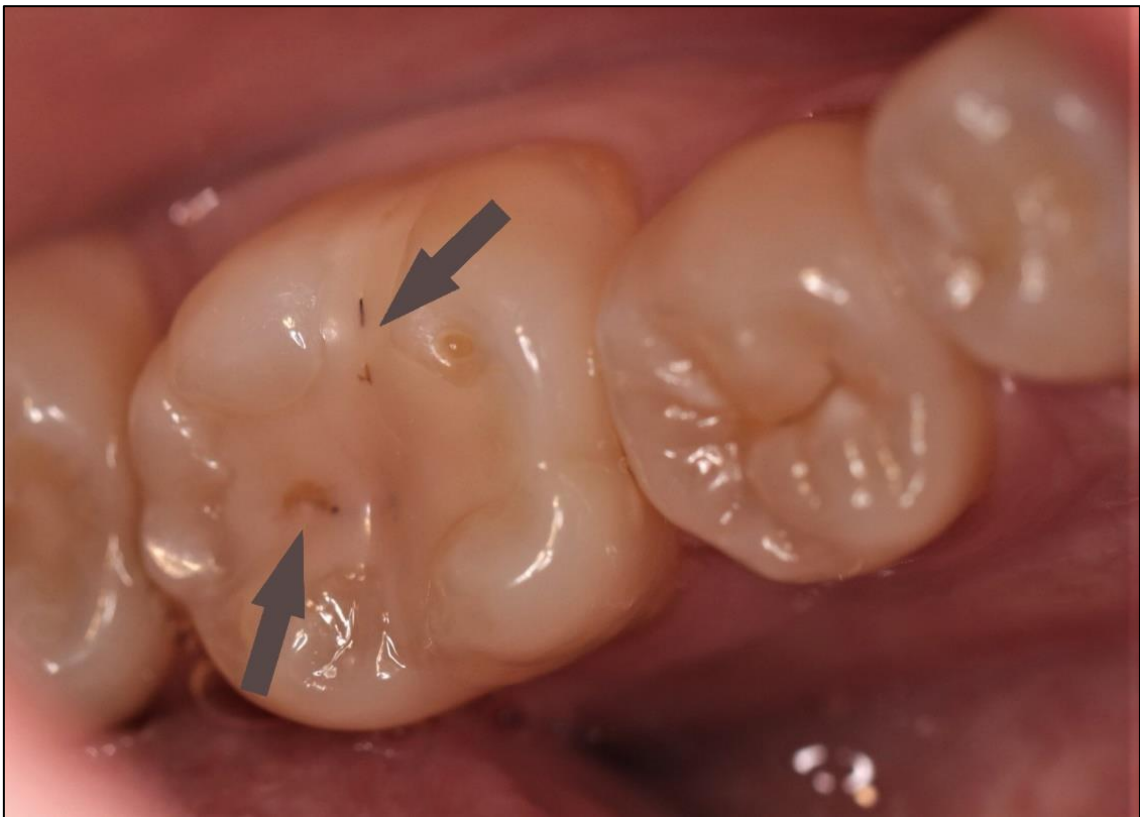


Abb. 26: FDI 2a, Score 2: Füllung an 36 ob (HU): leichte Oberflächenverfärbung, einfach durch Politur zu beheben

5.1.3 FDI 2b: Randverfärbung

Im Hinblick auf das Bewertungskriterium FDI 2b: Randverfärbung zeigte Herculite XRV Ultra zum Untersuchungszeitpunkt T_2 ein statistisch signifikant besseres Ergebnis als SonicFill ($p < 0,05$). Über den gesamten Beobachtungszeitraum konnte bei beiden Gruppen eine signifikante Verschlechterung hinsichtlich der Randverfärbungen beobachtet werden ($p < 0,05$).

Tab. 15: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 2b: Randverfärbung zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

FDI 2b: Randverfärbung		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T_0	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T_1	SF	90	10	0	0	0
	HU	90	10	0	0	0
T_2	SF	20	74	6	0	0
	HU	20	80	0	0	0

Tab. 16: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 2b: Randverfärbung in beiden Materialgruppen

FDI 2b: Randverfärbung		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	90	10	0	0	0
	T_2	20	74	6	0	0
Herculite XRV Ultra	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	90	10	0	0	0
	T_2	20	80	0	0	0

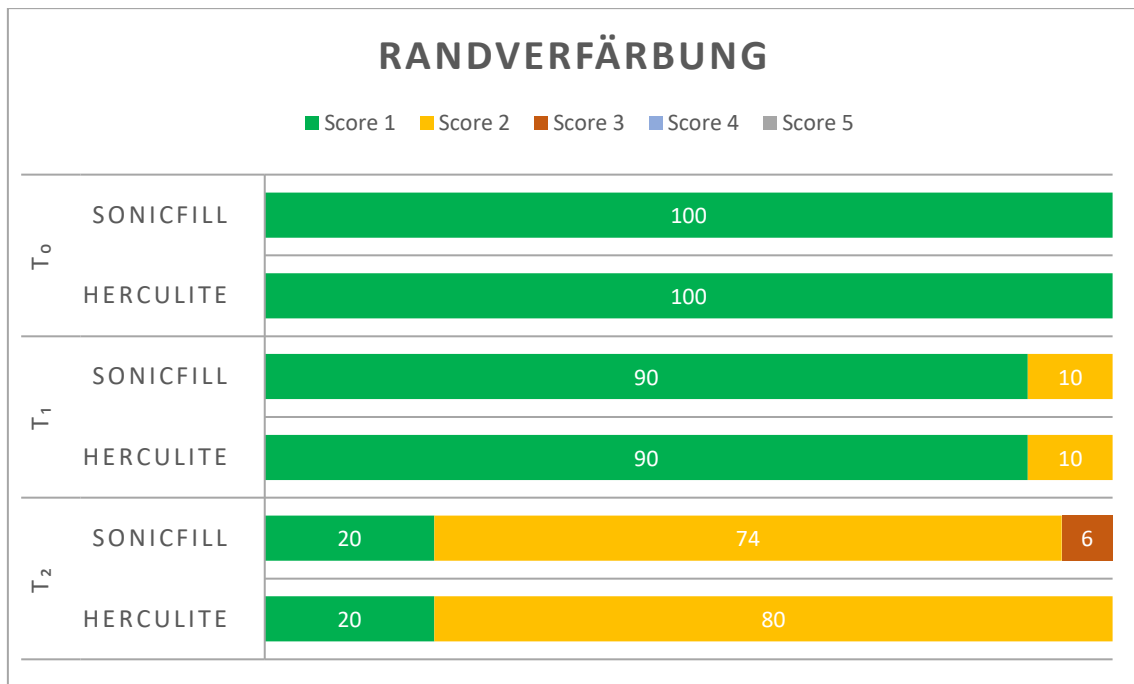


Abb. 27: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 2b: Randverfärbung in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

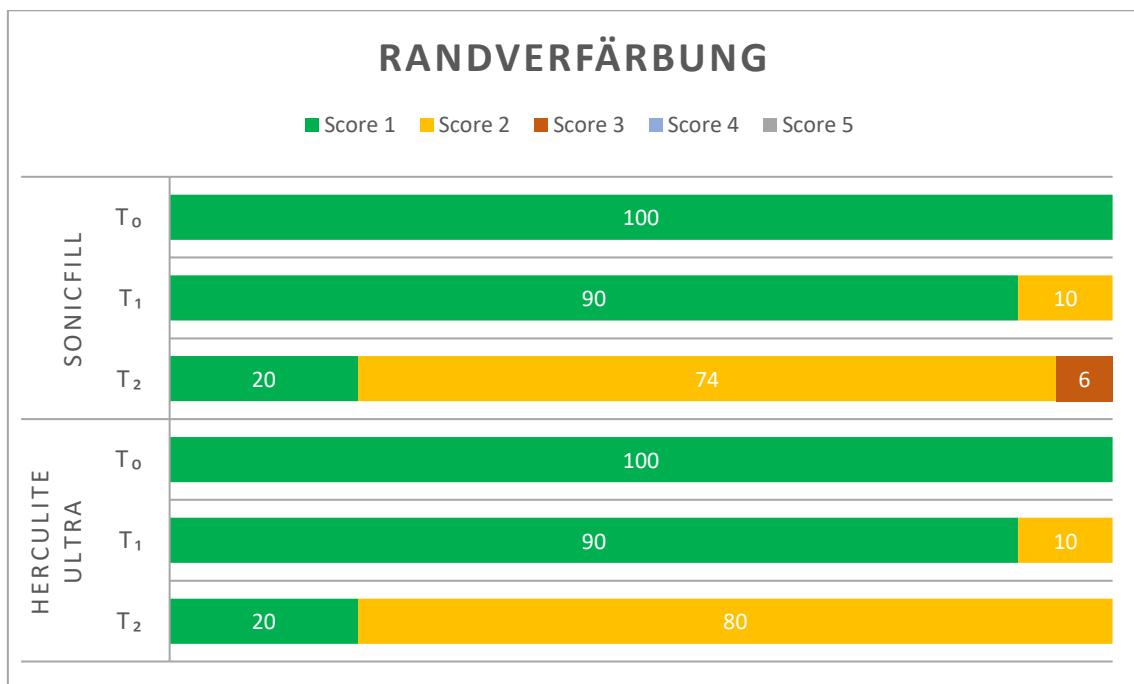


Abb. 28: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 2b: Randverfärbung in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 29: FDI 2b, Score 1: Füllung an 16 mod (SF): keine Randverfärbung



Abb. 30: FDI 2b, Score 3: Füllung an 24 mod (SF): mäßige Randverfärbung, nicht ästhetisch inakzeptabel, Verfärbung im approximalen Kasten

5.1.4 FDI 3: Farbübereinstimmung und Transluzenz

In der Kategorie FDI 3: Farbübereinstimmung und Transluzenz ergab sich zum Untersuchungszeitpunkt T_0 (Baseline) ein statistisch signifikant besseres Ergebnis in der Gruppe von Herculite XRV Ultra ($p < 0,05$). Beide Füllungsmaterialien zeigten eine signifikante Verschlechterung über den gesamten Beobachtungszeitraum ($p < 0,05$).

Tab. 17: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 3: Farbübereinstimmung zu den Zeitpunkten T_0, T_1, T_2

FDI 3: Farbübereinstimmung		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T_0	SF	82	15	3	0	0
	HU	90	10	0	0	0
T_1	SF	80	15	5	0	0
	HU	80	10	10	0	0
T_2	SF	10	82	4	4	0
	HU	10	86	4	0	0

Tab. 18: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 3: Farbübereinstimmung in beiden Materialgruppen

FDI 3: Farbübereinstimmung		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T_0	82	15	3	0	0
	T_1	80	15	5	0	0
	T_2	10	82	4	4	0
Herculite XRV Ultra	T_0	90	10	0	0	0
	T_1	80	10	10	0	0
	T_2	10	86	4	0	0

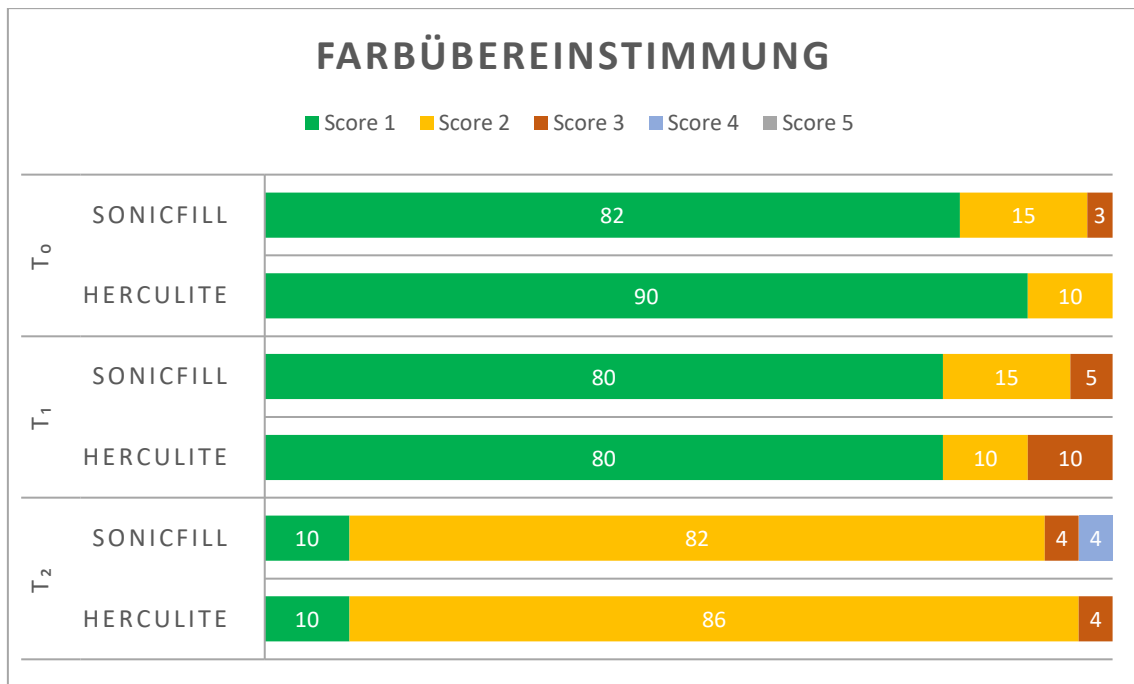


Abb. 31: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 3: Farbübereinstimmung in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

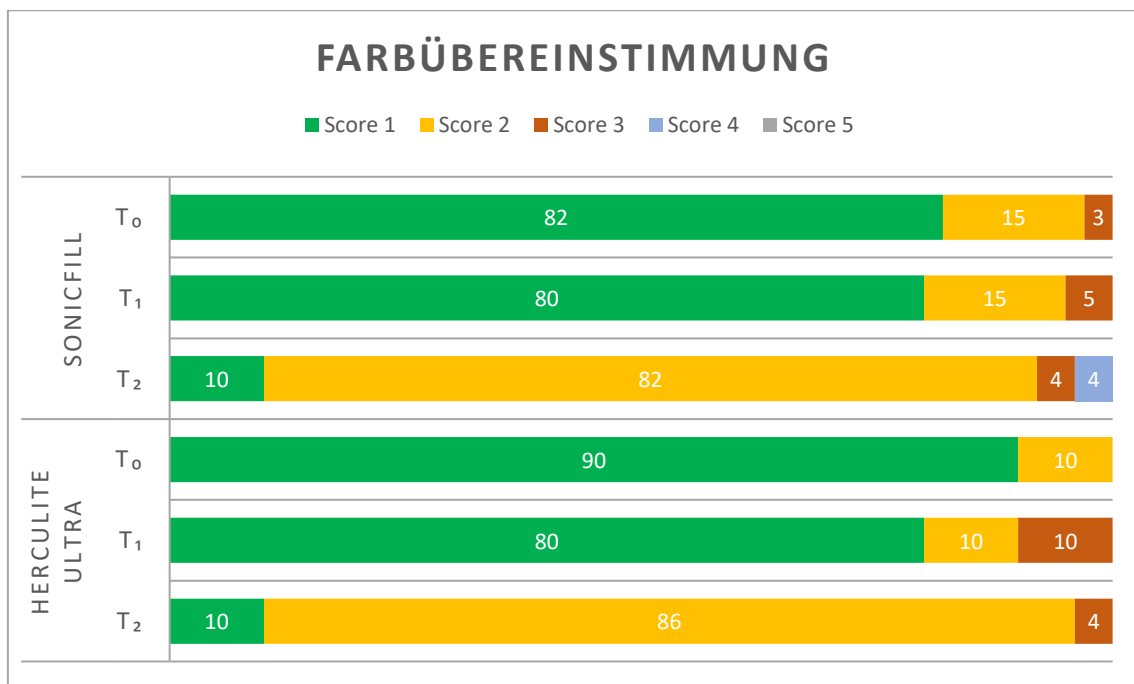


Abb. 32: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 3: Farbübereinstimmung in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf

Tab. 19: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 3: Transluzenz zu den Zeitpunkten T₀, T₁, T₂

FDI 3: Transluzenz		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T ₀	SF	80	10	10	0	0
	HU	90	10	0	0	0
T ₁	SF	70	15	15	0	0
	HU	85	15	0	0	0
T ₂	SF	48	50	2	0	0
	HU	50	48	2	0	0

Tab. 20: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 3: Transluzenz in beiden Materialgruppen

FDI 3: Transluzenz		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T ₀	80	10	10	0	0
	T ₁	70	15	15	0	0
	T ₂	48	50	2	0	0
Herculite XRV Ultra	T ₀	90	10	0	0	0
	T ₁	85	15	0	0	0
	T ₂	50	48	2	0	0

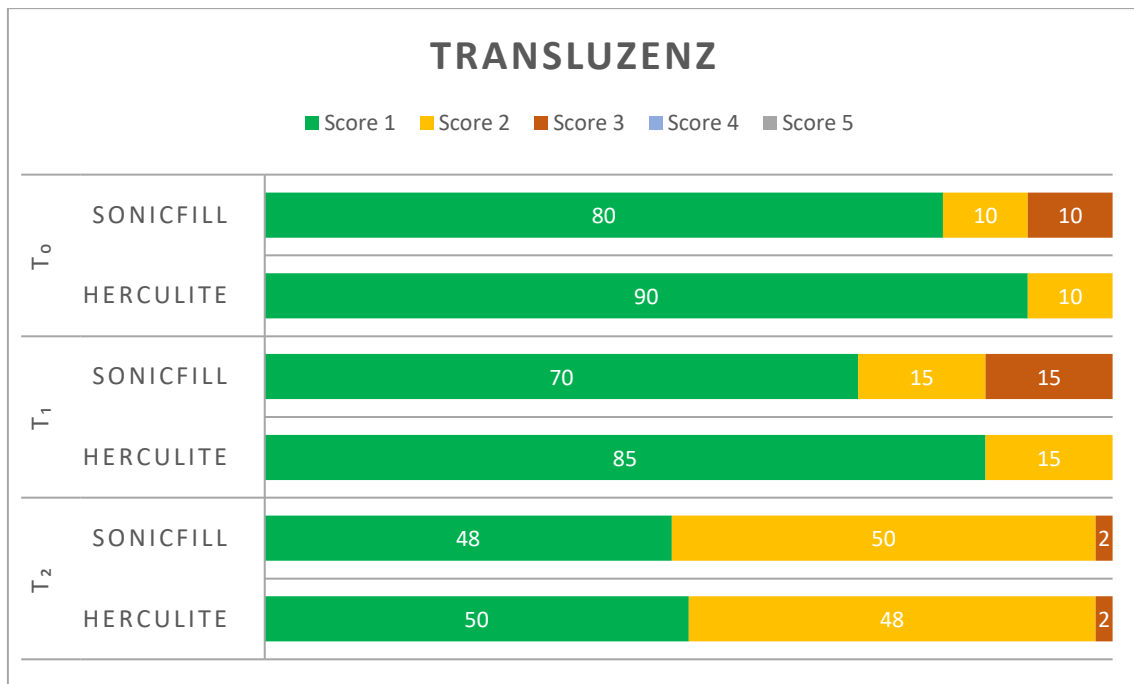


Abb. 33: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 3: Transluzenz in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

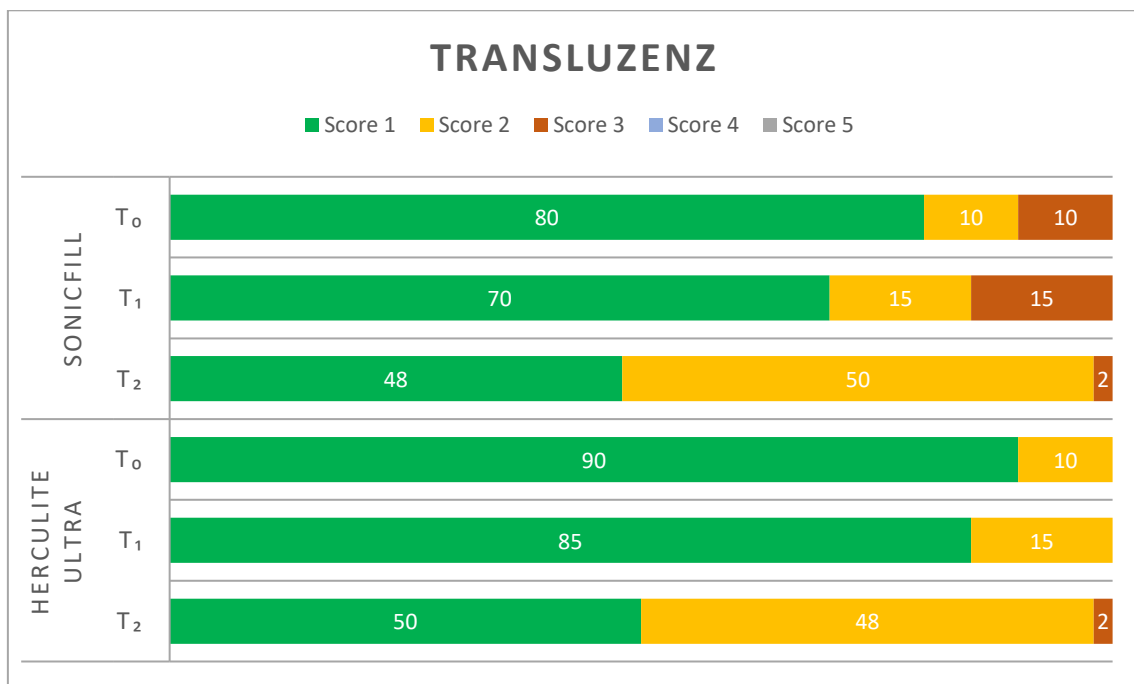


Abb. 34: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 3: Transluzenz in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 35: FDI 3, Score 1: Füllung an 15 mo (SF): in Farbe und Transluzenz gute Farbanpassung, kein Unterschied in Schattierung und/oder Transluzenz

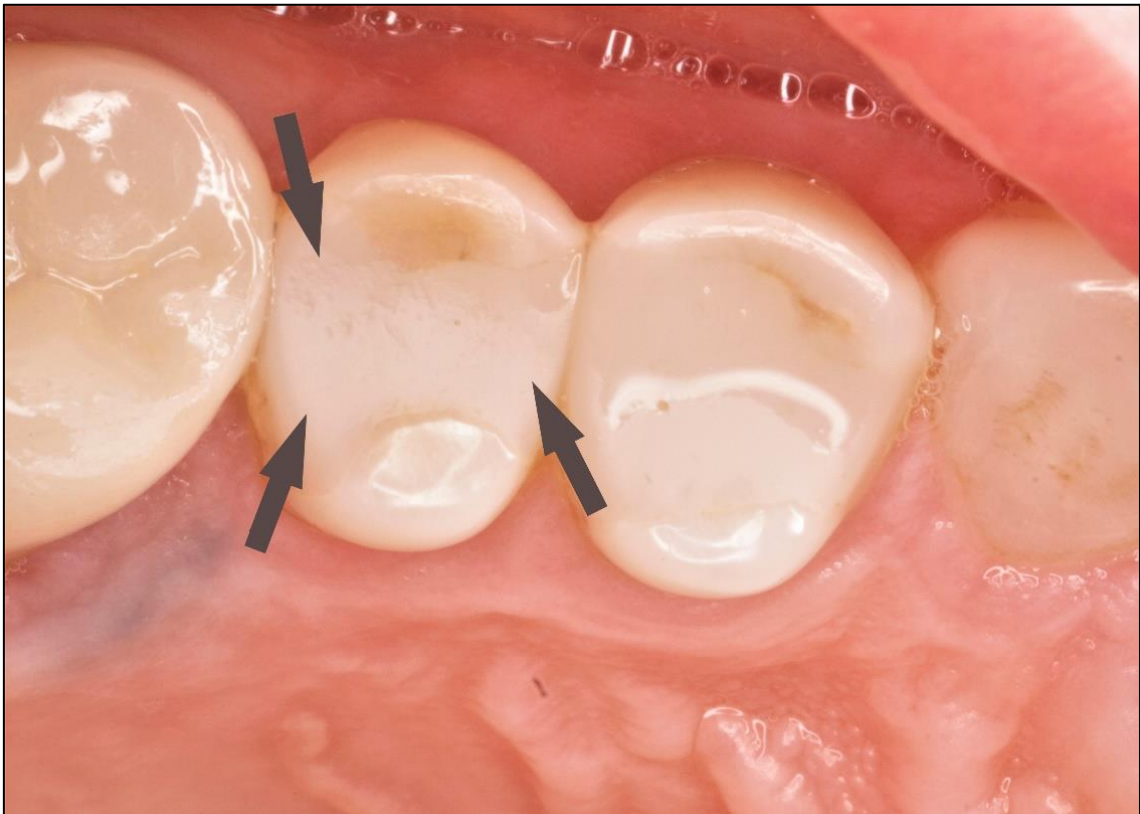


Abb. 36: FDI 3, Score 3: Füllung an 15 mod (SF): deutliche aber akzeptable Abweichung, beeinträchtigt nicht die Ästhetik

5.2 Ergebnisse der funktionellen Eigenschaften FDI 5–10

5.2.1 FDI 5: Materialfraktur und Retention

Bei der Betrachtung des Untersuchungskriteriums FDI 5: Materialfraktur und Retention war zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied zwischen den Materialgruppen nachzuweisen ($p > 0,05$). In beiden Gruppen waren zum Zeitpunkt T_2 eine geringe Anzahl an Füllungen verloren gegangen oder erneuert worden (SF: $n=5$, HU: $n=2$). Über den gesamten Beobachtungszeitraum betrachtet gingen in beiden Gruppen eine überschaubare Anzahl an Restaurationen verloren oder musste erneuert werden (SF: $n=8$, HU: $n=5$). Herculite XRV Ultra zeigte eine signifikante Verschlechterung hinsichtlich der Materialfraktur und Retention über den Beobachtungszeitraum ($p < 0,05$), in der SonicFill-Gruppe konnte eine statistische Signifikanz nicht festgestellt werden.

Tab. 21: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 5: Materialfraktur und Retention zu den Zeitpunkten T₀, T₁, T₂

FDI 5: Materialfraktur und Retention		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T ₀	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T ₁	SF	98	0	0	0	2
	HU	100	0	0	0	0
T ₂	SF	10	86	2	2	0
	HU	16	78	4	2	0

Tab. 22: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 5: Materialfraktur und Retention in beiden Materialgruppen

FDI 5: Materialfraktur und Retention		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	98	0	0	0	2
	T ₂	10	86	2	2	0
Herculite XRV Ultra	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	100	0	0	0	0
	T ₂	16	78	4	2	0

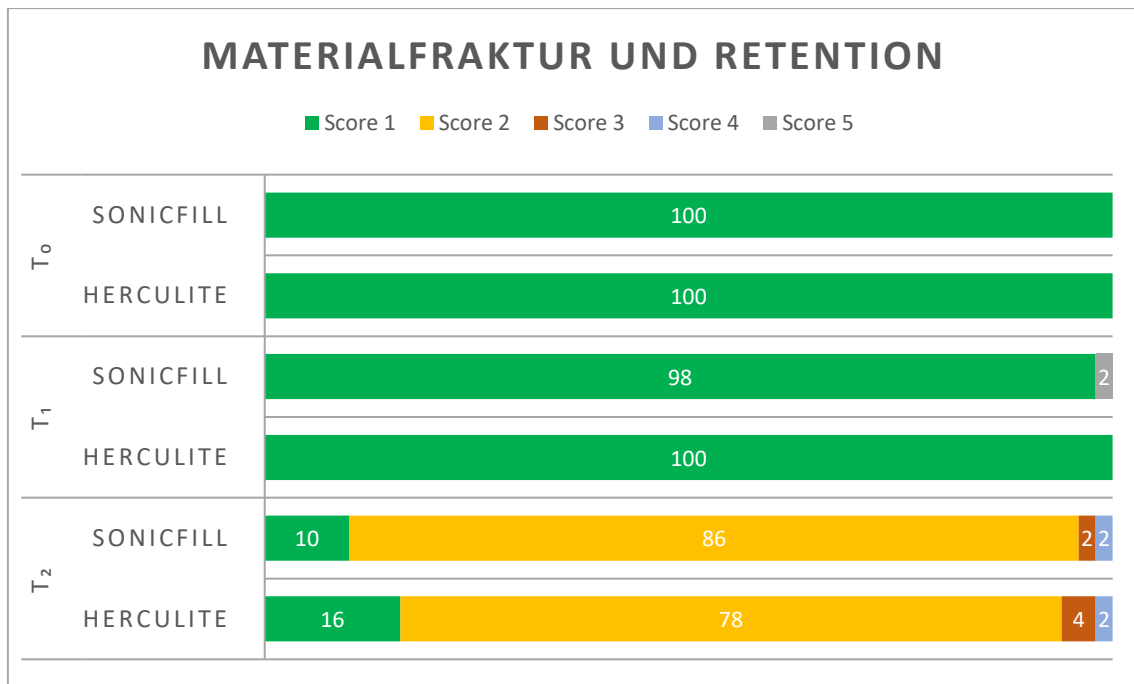


Abb. 37: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 5: Materialfraktur und Retention in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

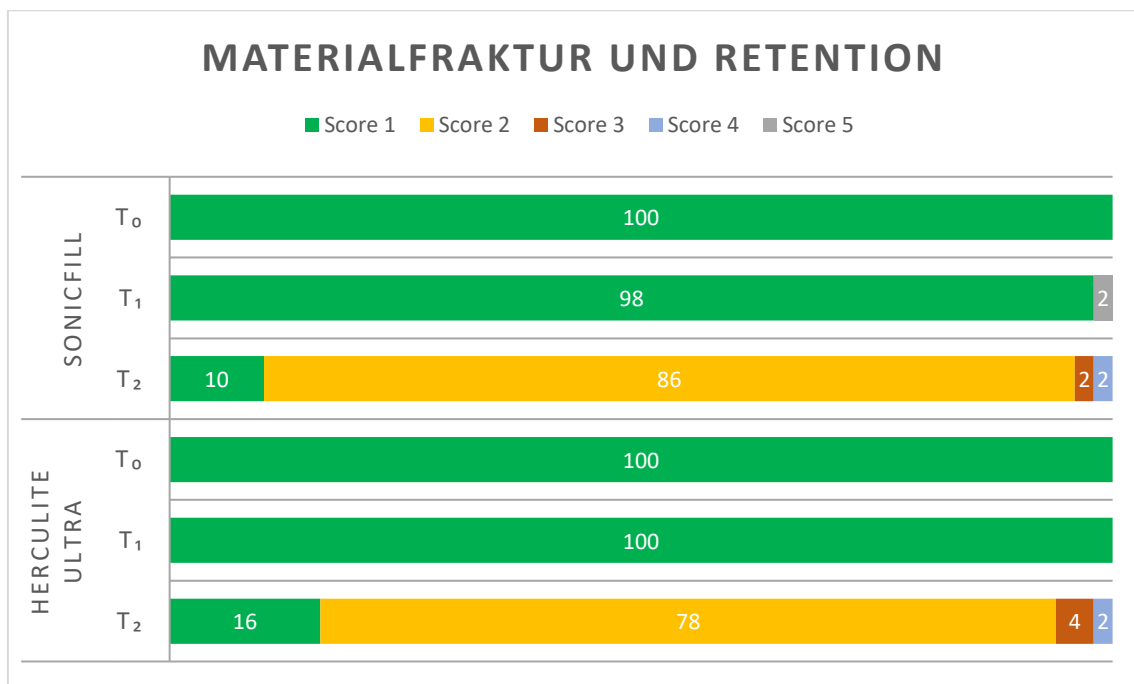


Abb. 38: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 5: Materialfraktur und Retention in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 39: FDI 5, Score 1: Füllung an 47 mo (SF): keine Fraktur oder Risse

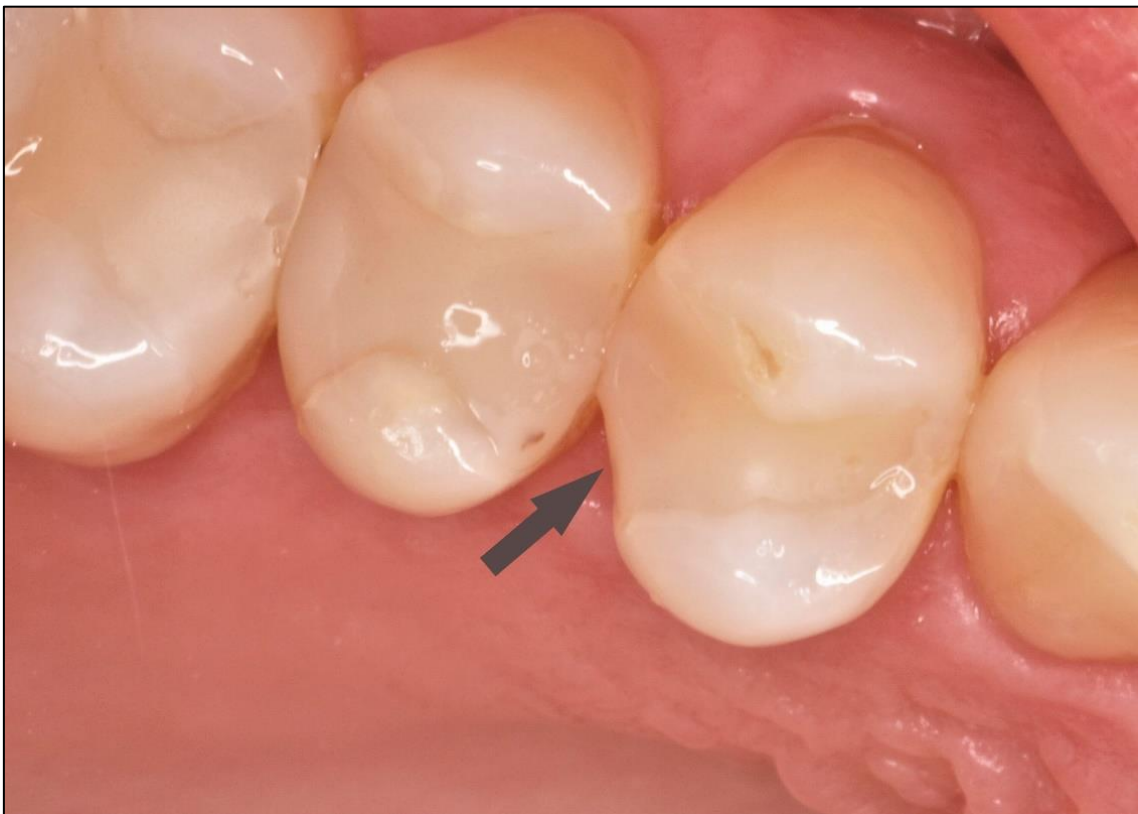


Abb. 40: FDI 5, Score 3: Füllung an 14 od (SF): zwei oder mehrere längere Haarrisse und/oder Materialabplatzungen, die die marginale Integrität oder den Approximalkontakt nicht beeinträchtigen. Materialabplatzung an der distopalatinalen Füllungsfläche ohne Verlust des Approximalkontaktes



Abb. 41: FDI 5, Score 4: Füllung an 24 mod (HU): Abplatzungen, die die marginale Integrität oder den Approximalkontakt beeinträchtigen oder Massenfraktur, mit partiellem Füllungsverlust (weniger als die Hälfte der Restauration). Sichtbare Materialfraktur im distalen Kasten mit Verlust des Approximalkontaktes, folglich auch in FDI 8a die Wertung mit Score 3.

5.2.2 FDI 6a: marginale Randfraktur

Bei der Auswertung des Kriteriums FDI 6a: marginale Randfraktur zeigte Herculite XRV Ultra zum Beobachtungszeitpunkt T_2 ein statistisch signifikant besseres Ergebnis im Vergleich zu SonicFill ($p < 0,05$). Dies ist auf eine Restauration in der SonicFill-Gruppe zurückzuführen, die eine Massenfraktur zeigte und folglich in allen Kriterien der Kategorie FDI 6 die Bewertung Score 5 erhielt (Abb. 45). In beiden Materialgruppen konnte eine signifikante Verschlechterung über den gesamten Beobachtungszeitraum betrachtet dargestellt werden ($p < 0,05$).

Tab. 23: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6a: marginale Randfraktur zu den Zeitpunkten T_0, T_1, T_2

FDI 6a: marginale Randfraktur		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T_0	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T_1	SF	80	20	0	0	0
	HU	86	14	0	0	0
T_2	SF	20	76	2	0	2
	HU	22	78	0	0	0

Tab. 24: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6a: marginale Randfraktur in beiden Materialgruppen

FDI 6a: marginale Randfraktur		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	80	20	0	0	0
	T_2	20	76	2	0	2
Herculite XRV Ultra	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	86	14	0	0	0
	T_2	22	78	0	0	0

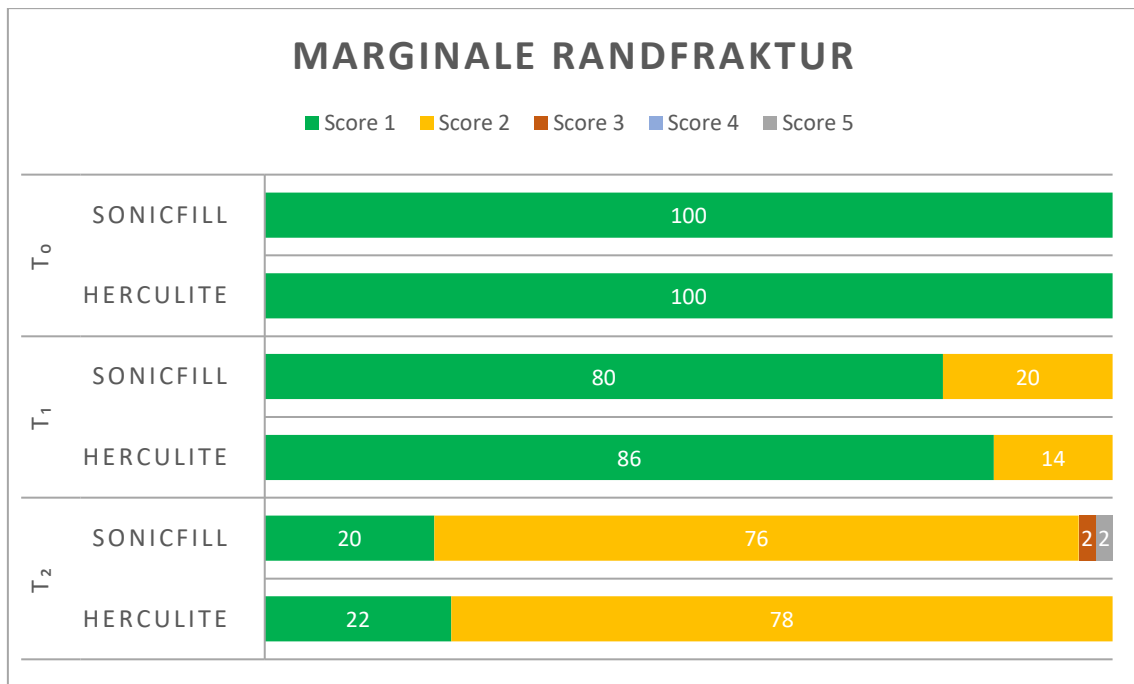


Abb. 42: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6a: marginale Randfraktur in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

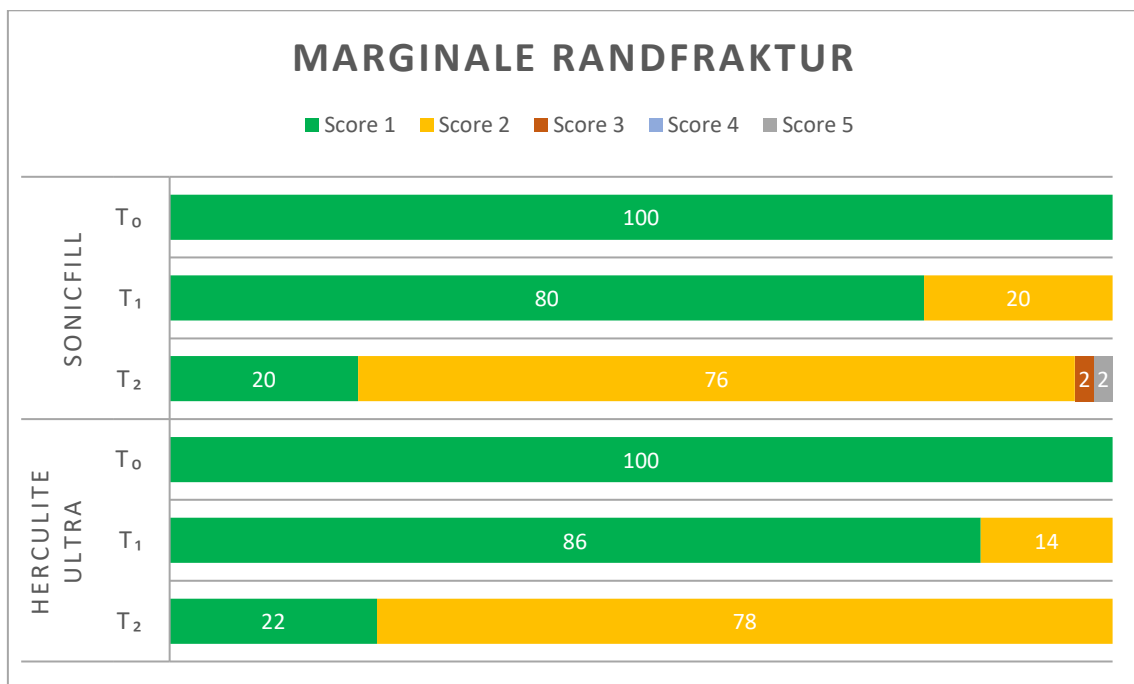


Abb. 43: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6a: marginale Randfraktur in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 44: FDI 6a, Score 1: Füllung an 25 mod (HU): harmonisches Bild, keine Spalten, weiße oder verfärbte Linien

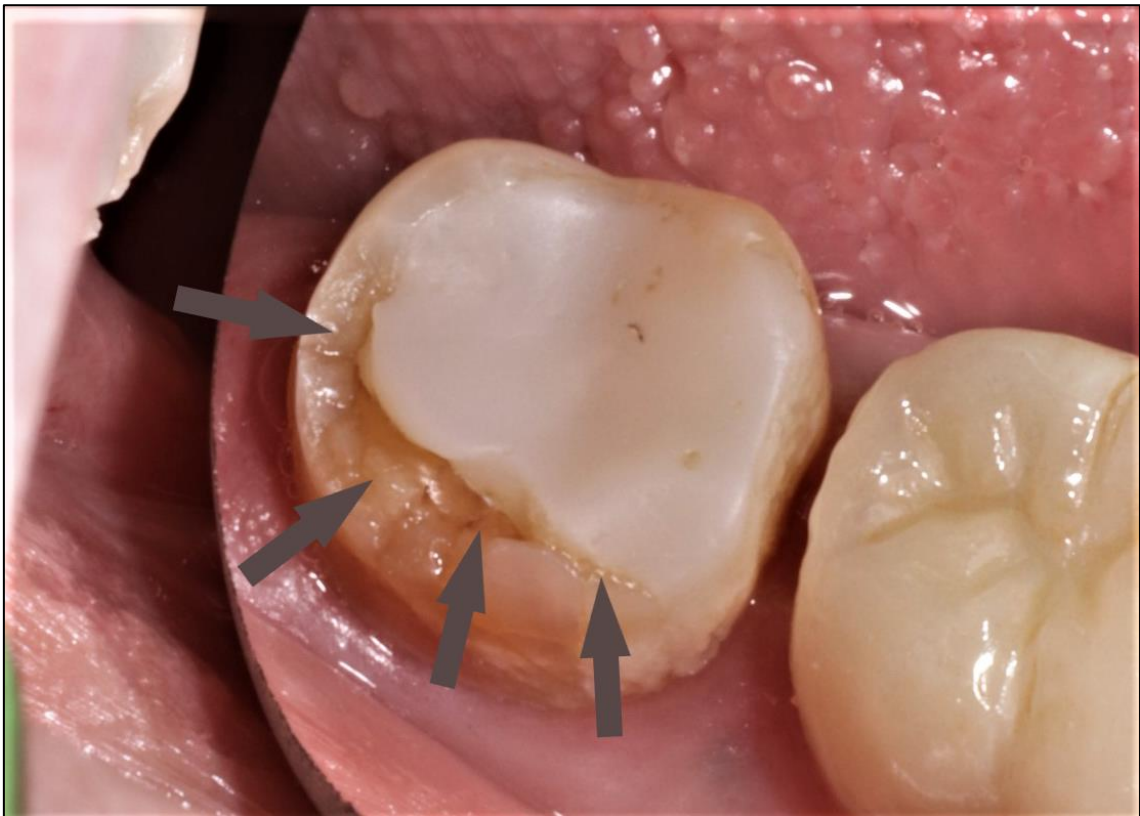


Abb. 45: FDI 6a, b, und c, Score 5: Füllung an 48 mo (SF): a und c: Generalisiert große Lücken oder Unregelmäßigkeiten, b: Restauration (ganz oder teilweise) locker aber in situ

5.2.3 FDI 6b: Randspalt

Die Auswertung der Kategorie FDI 6b: Randspalt ergab zum Zeitpunkt T₂ ein statistisch signifikant besseres Ergebnis der Herculite-Gruppe im Vergleich zur SonicFill-Gruppe ($p < 0,05$). Sowohl in der SonicFill- als auch der Herculite-Gruppe zeigten sich im Laufe des Beobachtungszeitraums signifikante Verschlechterungen hinsichtlich des Randspaltes ($p < 0,05$).

Tab. 25: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6b: Randspalt zu den Zeitpunkten T₀, T₁, T₂

FDI 6b: Randspalt		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T ₀	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T ₁	SF	95	5	0	0	0
	HU	96	4	0	0	0
T ₂	SF	18	78	2	0	2
	HU	20	80	0	0	0

Tab. 26: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6b: Randspalt in beiden Materialgruppen

FDI 6b: Randspalt		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	95	5	0	0	0
	T ₂	18	78	2	0	2
Herculite XRV Ultra	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	96	4	0	0	0
	T ₂	20	80	0	0	0

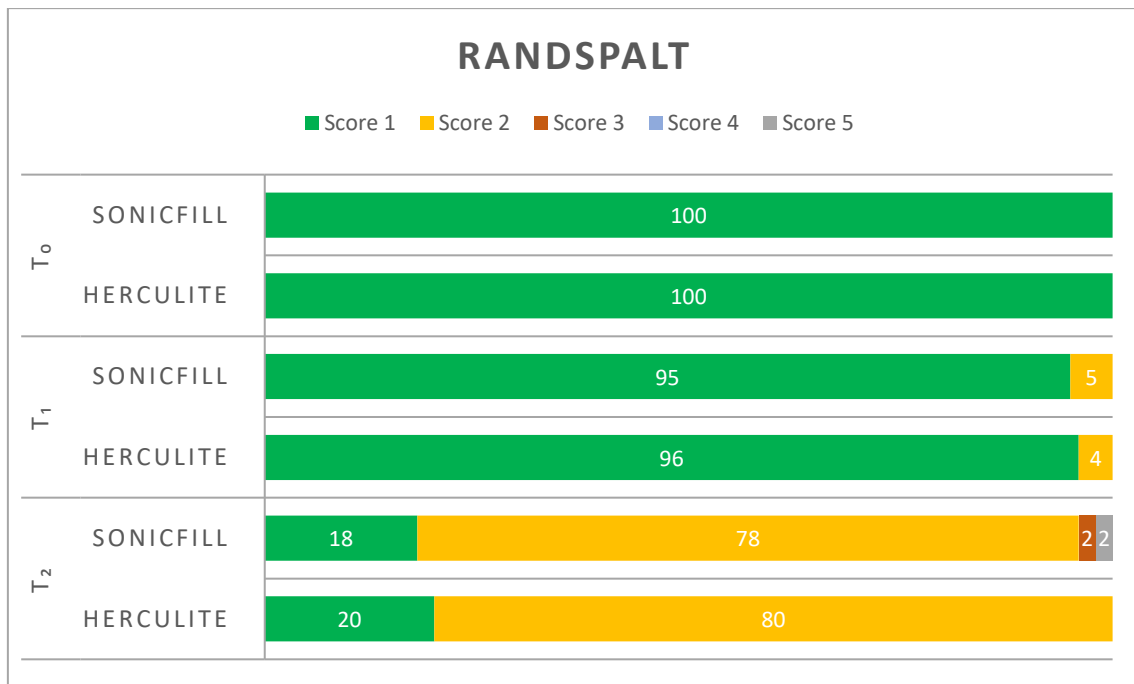


Abb. 46: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6b: Randspalt in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

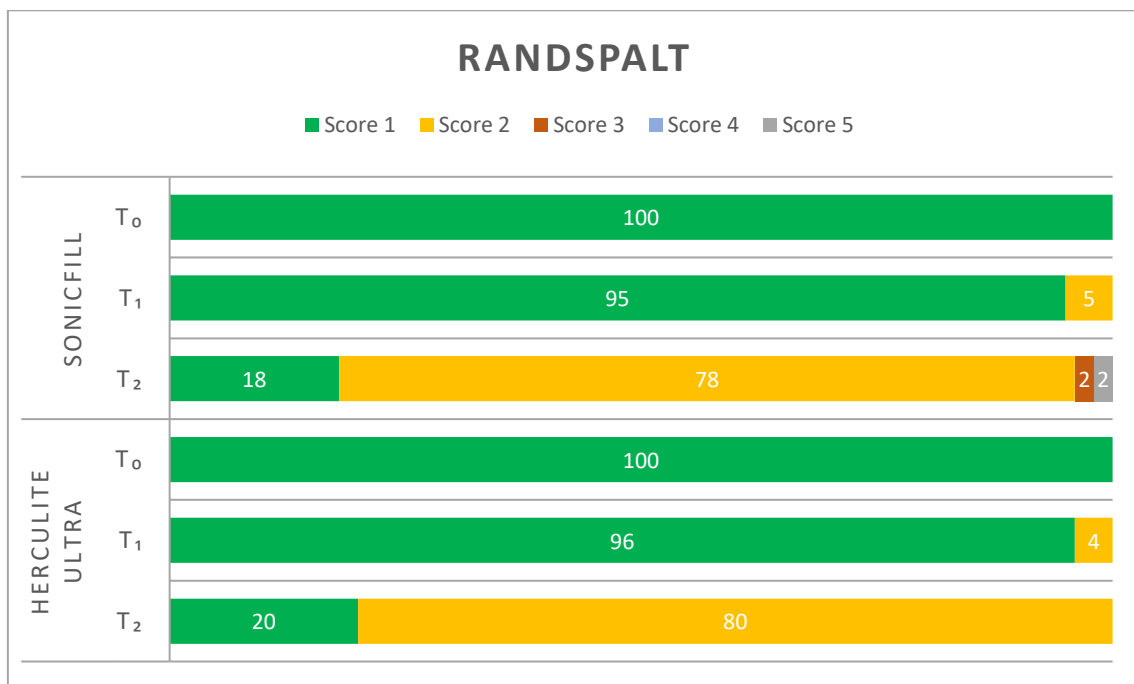


Abb. 47: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6b: Randspalt in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 48: FDI 6b, Score 1: Füllung an 25 mod (HU): harmonisches Bild, keine Spalten, weiße oder verfärbte Linien



Abb. 49: FDI 6b, Score 3: Füllung an 35 od (SF): Spalt $<250\mu\text{m}$, nicht entfernbar

5.2.4 FDI 6c: Randdefizit

In der Kategorie FDI 6c: Randdefizit ergab sich im Gruppenvergleich zum Zeitpunkt T_2 ein statistisch signifikant besseres Ergebnis in der Herculite-Gruppe ($p < 0,05$). Im Laufe des Beobachtungszeitraums zeigten sowohl die SonicFill- als auch die Herculite-Gruppe signifikante Verschlechterungen hinsichtlich der Bildung von Randdefiziten ($p < 0,05$).

Tab. 27: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6c: Randdefizit zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

FDI 6c: Randdefizit		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T_0	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T_1	SF	60	40	0	0	0
	HU	55	45	0	0	0
T_2	SF	10	86	2	0	2
	HU	16	84	0	0	0

Tab. 28: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 6c: Randdefizit in beiden Materialgruppen

FDI 6c: Randdefizit		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	60	40	0	0	0
	T_2	10	86	2	0	2
Herculite XRV Ultra	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	55	45	0	0	0
	T_2	16	84	0	0	0

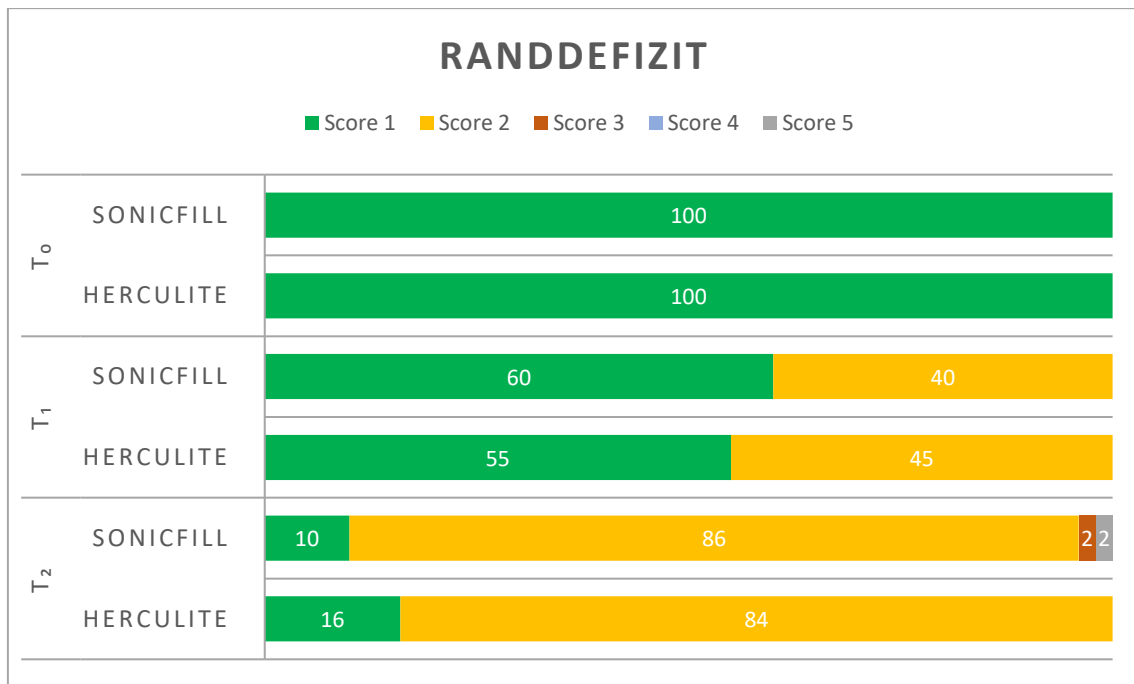


Abb. 50: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6c: Randdefizit in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

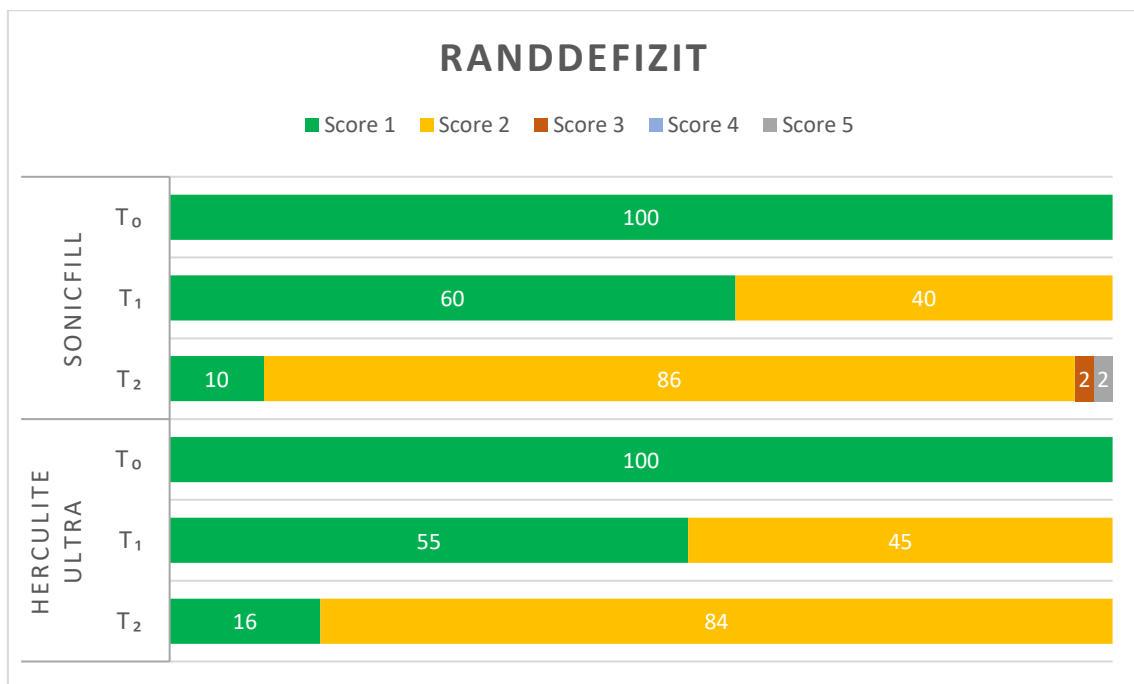


Abb. 51: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 6c: Randdefizit in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 52: FDI 6c, Score 1: Füllung an 15 mo (SF): harmonisches Bild, keine Spalten, weiße oder verfärbte Linien



Abb. 53: FDI 6c, Score 3: Füllung an 46 ob (SF): größere Unregelmäßigkeiten, Furchen oder Grate, Stufen. Zudem sichtbare starke Abrasion.

5.2.5 FDI 8a: Approximalkontakt

Die Untersuchung des Bewertungskriteriums FDI 8a: Approximalkontakt ergab zu keinem Zeitpunkt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Materialgruppen ($p > 0,05$). Zudem zeigten beide Materialien im Verlauf keine signifikante Verschlechterung der Approximalkontakte ($p > 0,05$).

Tab. 29: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 8a: Approximalkontakt zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

FDI 8a: Approximalkontakt		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T₀	SF	90	10	0	0	0
	HU	95	5	0	0	0
T₁	SF	90	10	0	0	0
	HU	95	5	0	0	0
T₂	SF	94	6	0	0	0
	HU	98	0	2	0	0

Tab. 30: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 8a: Approximalkontakt in beiden Materialgruppen

FDI 8a: Approximalkontakt		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T₀	90	10	0	0	0
	T₁	90	10	0	0	0
	T₂	94	6	0	0	0
Herculite XRV Ultra	T₀	95	5	0	0	0
	T₁	95	5	0	0	0
	T₂	98	0	2	0	0

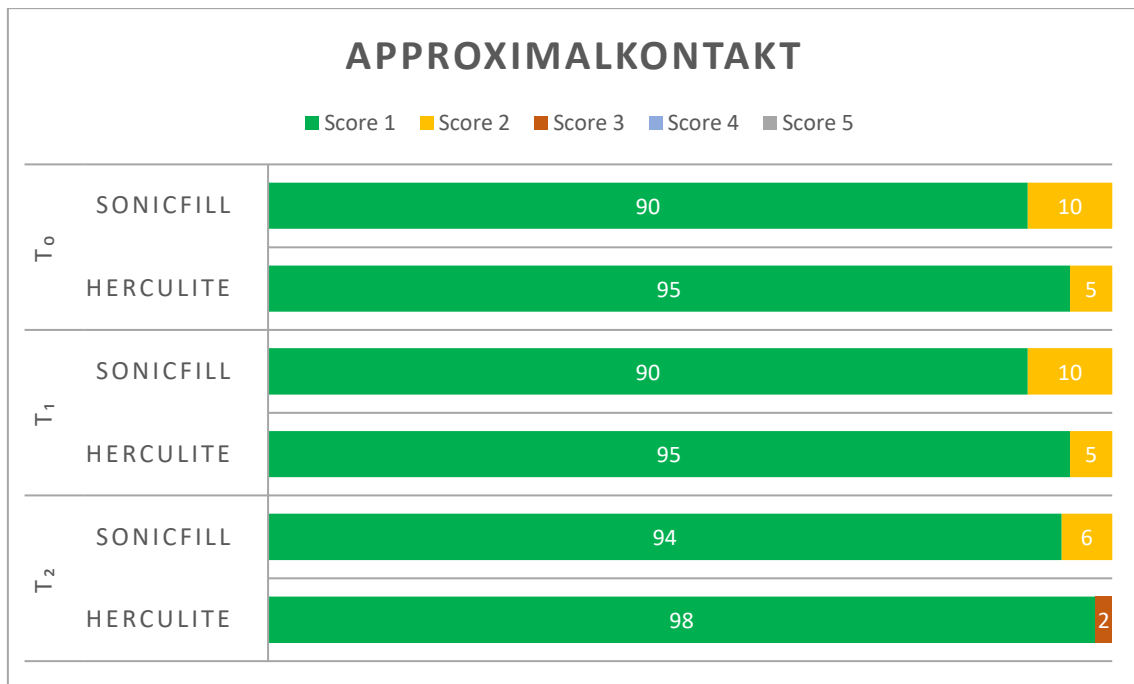


Abb. 54: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 8a: Approximalkontakt in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

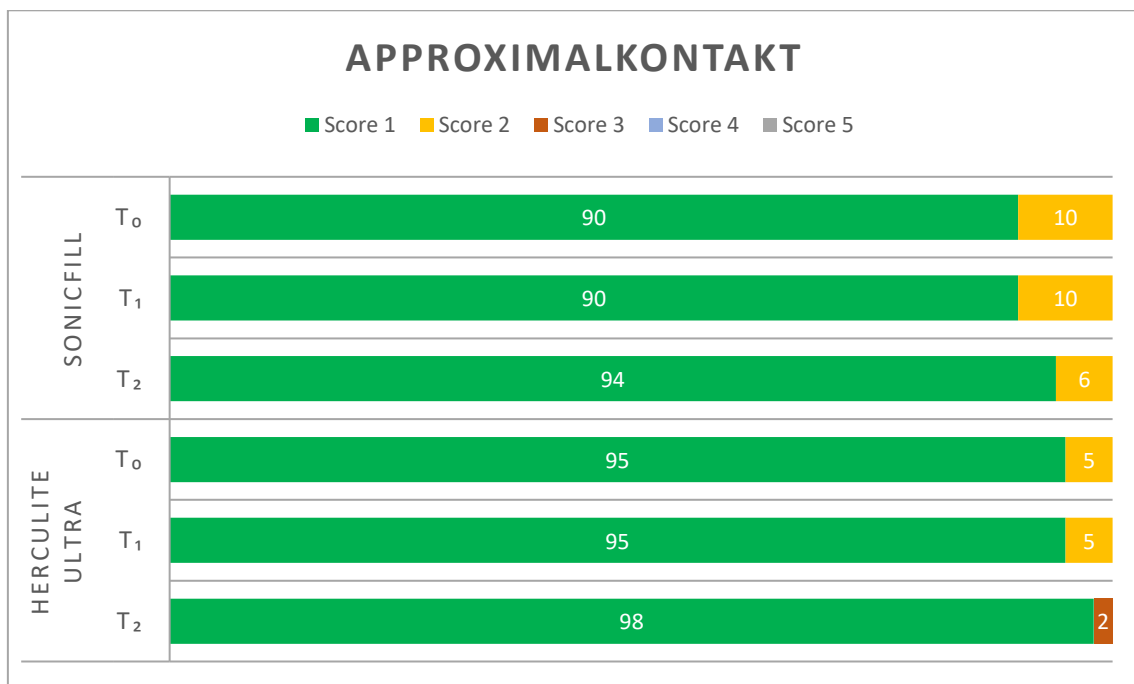


Abb. 55: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 8a: Approximalkontakt in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 56: FDI 8a, Score 1: Füllungen an 25 od, 26 mo (SF): Normaler Kontaktpunkt, Zahnseide oder 25 µm dickes Metallblatt können passieren

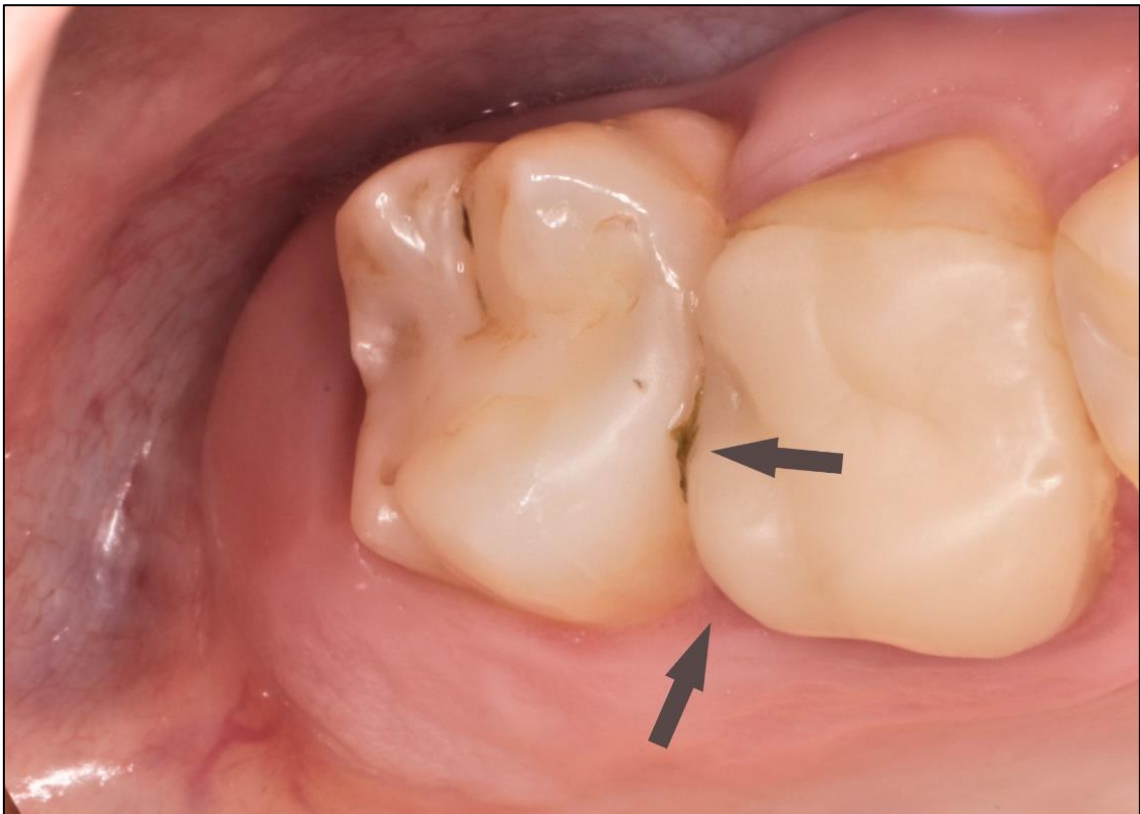


Abb. 57: FDI 8a, Score 3: Füllung an 18 mo (HU): etwas schwacher Kontakt, kein Hinweis auf Beschädigungen des Zahnes, der Gingiva oder parodontaler Strukturen, 50 µm dickes Metallblatt kann passieren. Deutlich sichtbare Speiseimpaktion bei entzündungsfreier Gingiva

5.2.6 FDI 10: Patientensicht

Alle Patienten zeigten sich zu jedem Zeitpunkt der Nachuntersuchungen zufrieden mit der Ästhetik und Funktion der Füllungen, als auch mit dem Behandlungsprozedere. Daher konnte zu keinem Zeitpunkt im Gruppenvergleich sowie im zeitlichen Verlauf innerhalb der Gruppen ein statistisch signifikanter Unterschied oder Veränderungen festgestellt werden ($p>0,05$). Keiner der Patienten gab bei einem der durchgeführten visual analog scales (VAS) an, an Temperatur- oder Aufbissbeschwerden zu leiden.

Tab. 31: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 10: Patientensicht zu den Zeitpunkten T₀, T₁, T₂

FDI 10: Patientensicht		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T ₀	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T ₁	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T ₂	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0

Tab. 32: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 10: Patientensicht in beiden Materialgruppen

FDI 10: Patientensicht		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	100	0	0	0	0
	T ₂	100	0	0	0	0
Herculite XRV Ultra	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	100	0	0	0	0
	T ₂	100	0	0	0	0

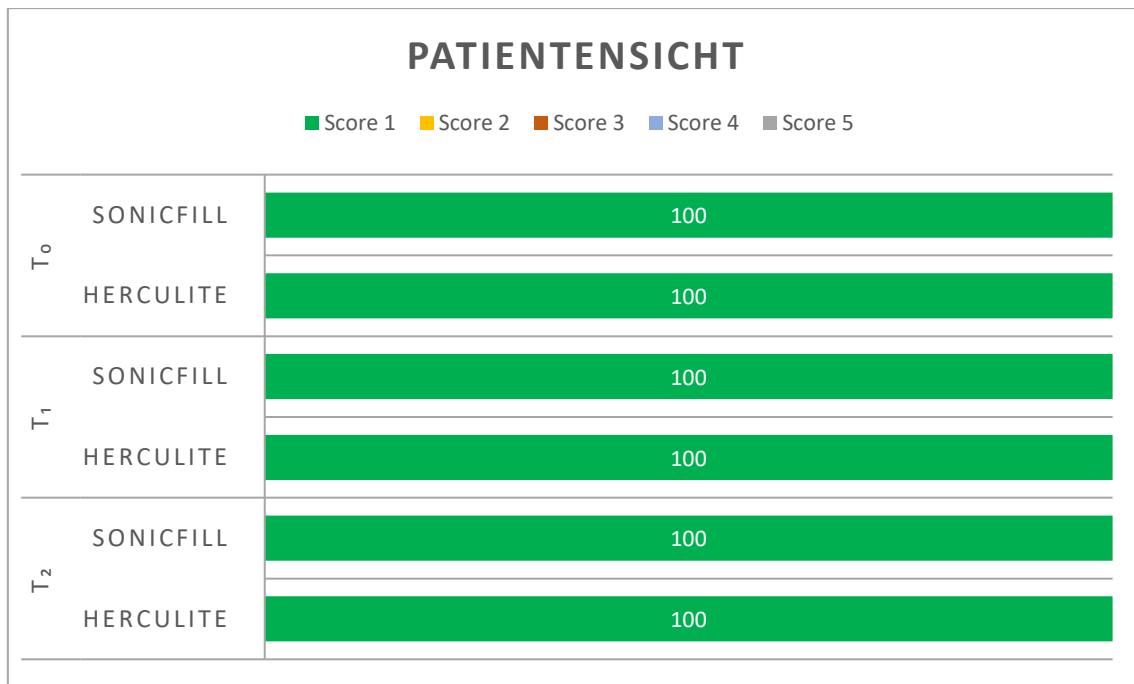


Abb. 58: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 10: Patientensicht in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

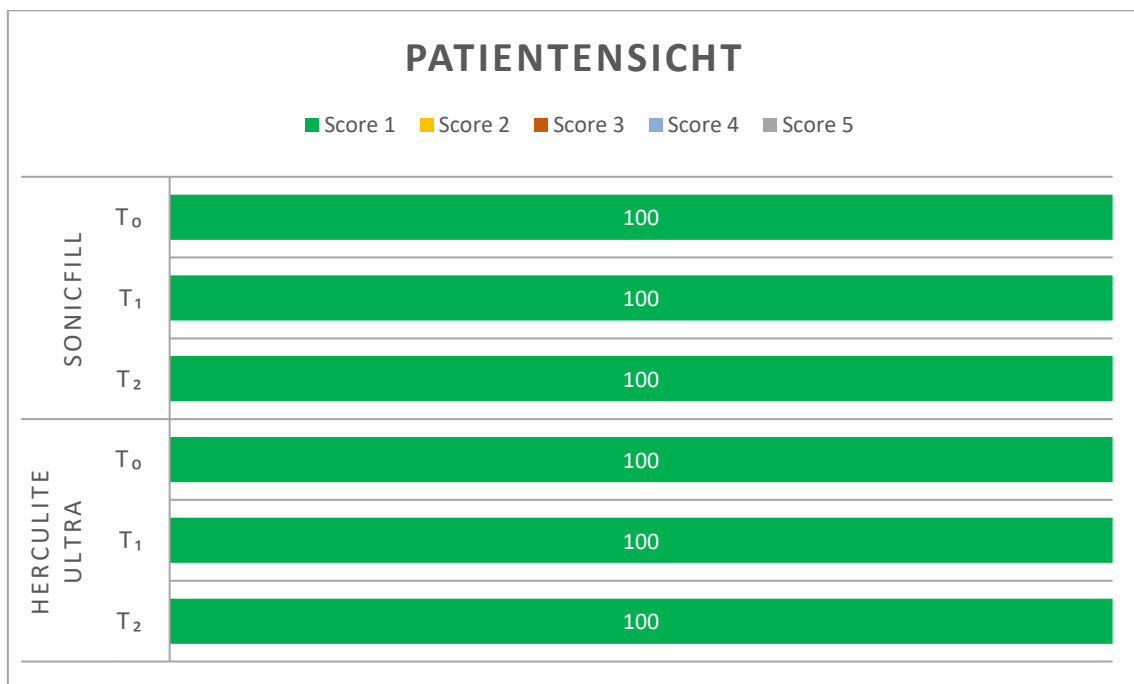


Abb. 59: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 10: Patientensicht in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf

5.3 Ergebnisse der biologischen Eigenschaften FDI 11–13

5.3.1 FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten und Zahnvitalität

Das Untersuchungskriterium FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten und Zahnvitalität zeigte im Untersuchungszeitraum keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Materialien ($p > 0,05$). Zum Zeitpunkt T_1 musste in beiden Gruppen ein restaurierter Zahn aufgrund anhaltender pulpitischer Beschwerden endodontisch behandelt werden. Innerhalb der Materialgruppen war im zeitlichen Verlauf keine signifikante Verschlechterung festzustellen ($p > 0,05$).

Tab. 33: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten zu den Zeitpunkten T₀, T₁, T₂

FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T ₀	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T ₁	SF	98	0	0	0	2
	HU	92	6	0	0	2
T ₂	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0

Tab. 34: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten in beiden Materialgruppen

FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	98	0	0	0	2
	T ₂	100	0	0	0	0
Herculite XRV Ultra	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	92	6	0	0	2
	T ₂	100	0	0	0	0

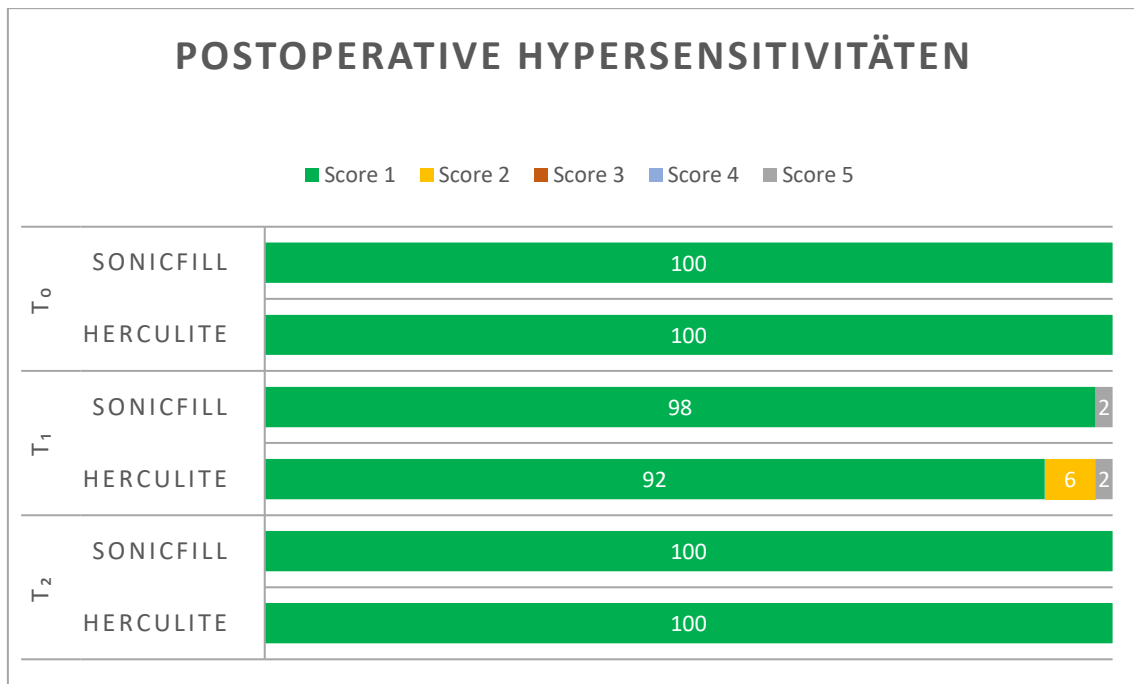


Abb. 60: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

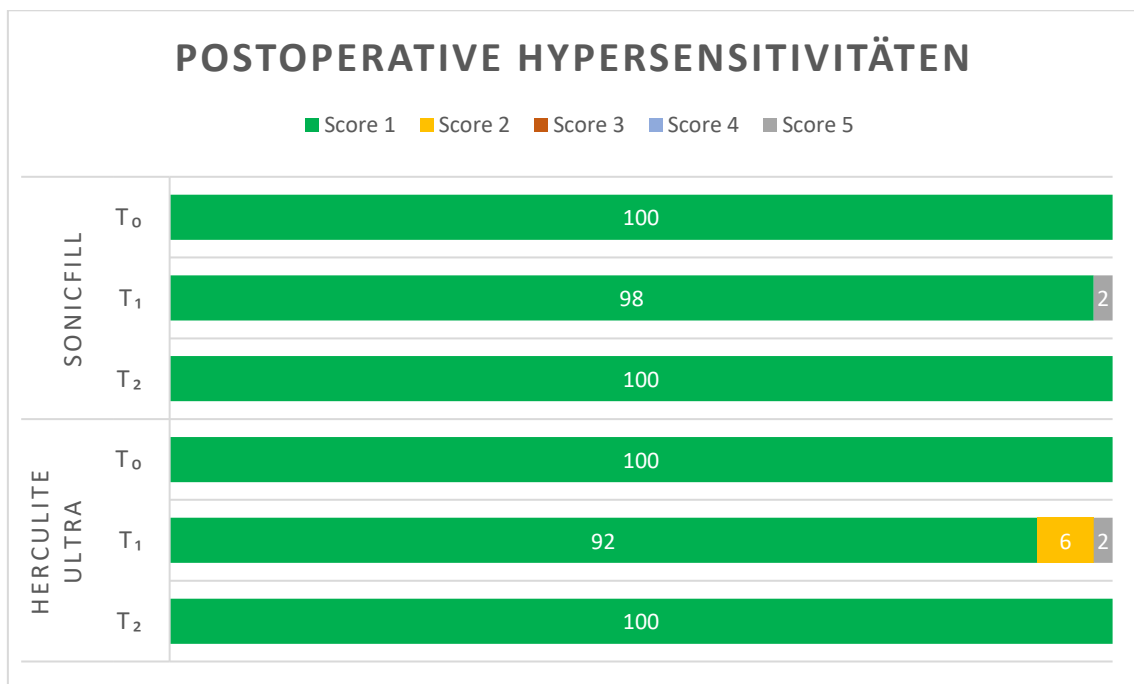


Abb. 61: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf

Tab. 35: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 11: Vitalität zu den Zeitpunkten T₀, T₁, T₂

FDI 11: Vitalität		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T ₀	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T ₁	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T ₂	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0

Tab. 36: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 11: Vitalität in beiden Materialgruppen

FDI 11: Vitalität		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	100	0	0	0	0
	T ₂	100	0	0	0	0
Herculite XRV Ultra	T ₀	100	0	0	0	0
	T ₁	100	0	0	0	0
	T ₂	100	0	0	0	0

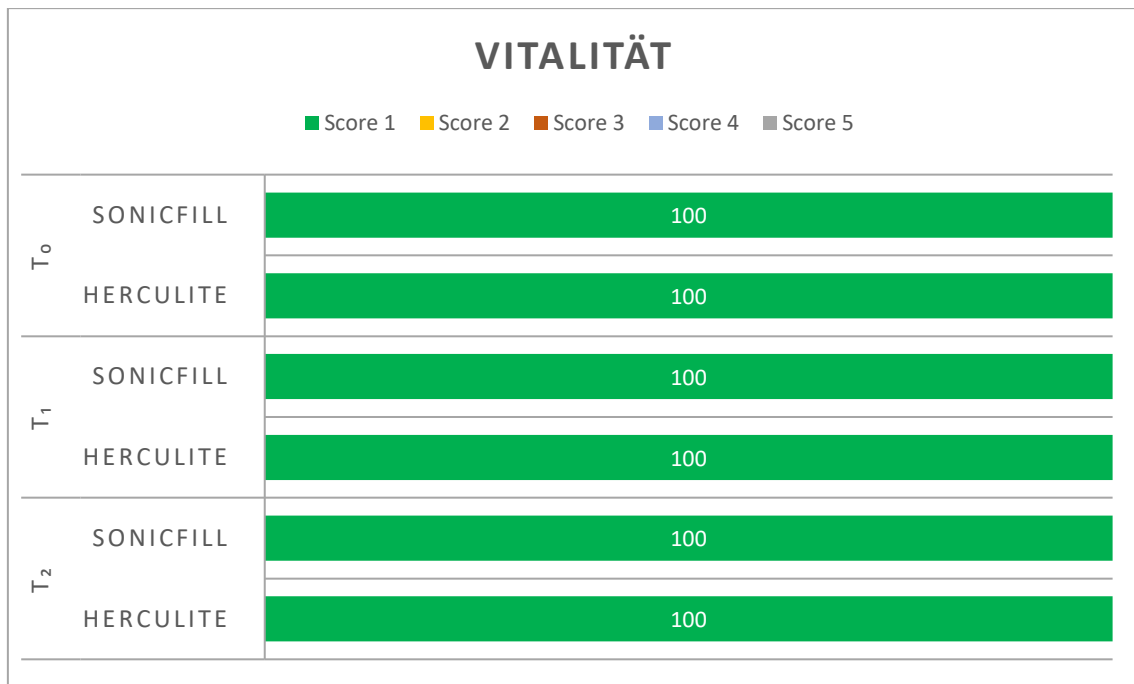


Abb. 62: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 11: Vitalität in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

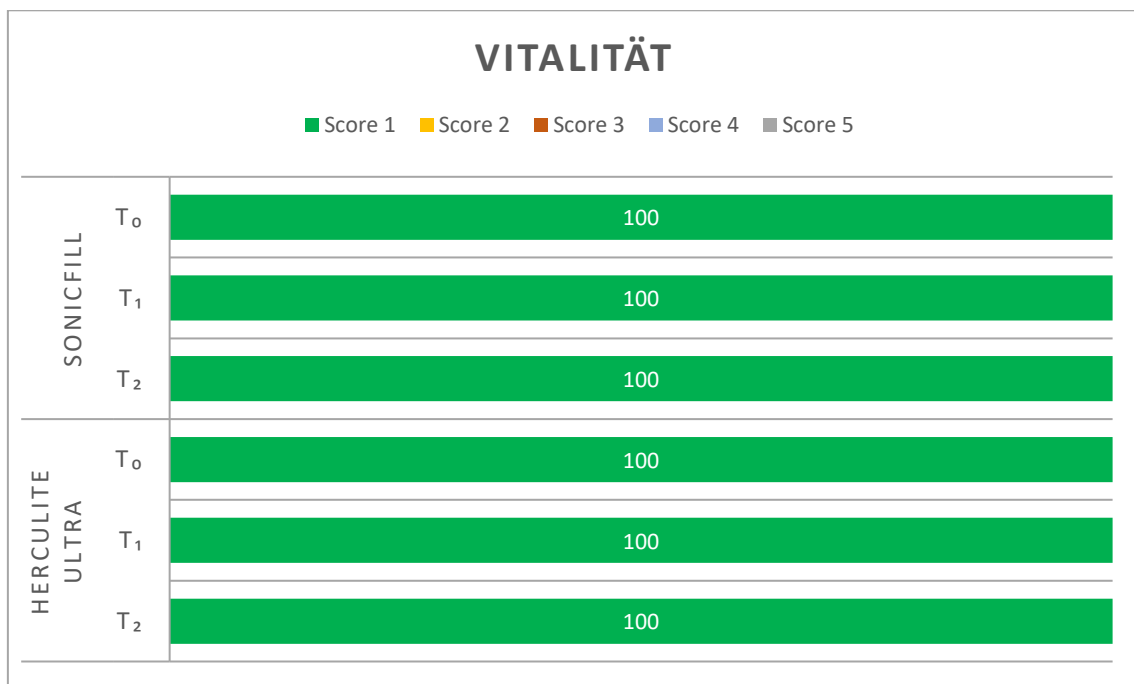


Abb. 63: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 11: Vitalität in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf

5.3.2 FDI 12: Sekundärkaries

Hinsichtlich des Bewertungskriteriums FDI 12: Sekundärkaries konnte zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied zwischen den Materialgruppen ermittelt werden ($p>0,05$). In beiden Gruppen war im Beobachtungszeitraum keine signifikante Zunahme an Sekundärkaries festzustellen ($p>0,05$).

Tab. 37: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 12: Sekundärkaries zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

FDI 12: Sekundärkaries		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T_0	SF	100	0	0	0	0
	HU	100	0	0	0	0
T_1	SF	98	0	0	0	2
	HU	96	0	0	0	4
T_2	SF	92	6	0	0	2
	HU	96	4	0	0	0

Tab. 38: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 12: Sekundärkaries in beiden Materialgruppen

FDI 12: Sekundärkaries		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	98	0	0	0	2
	T_2	92	6	0	0	2
Herculite XRV Ultra	T_0	100	0	0	0	0
	T_1	96	0	0	0	4
	T_2	96	4	0	0	0

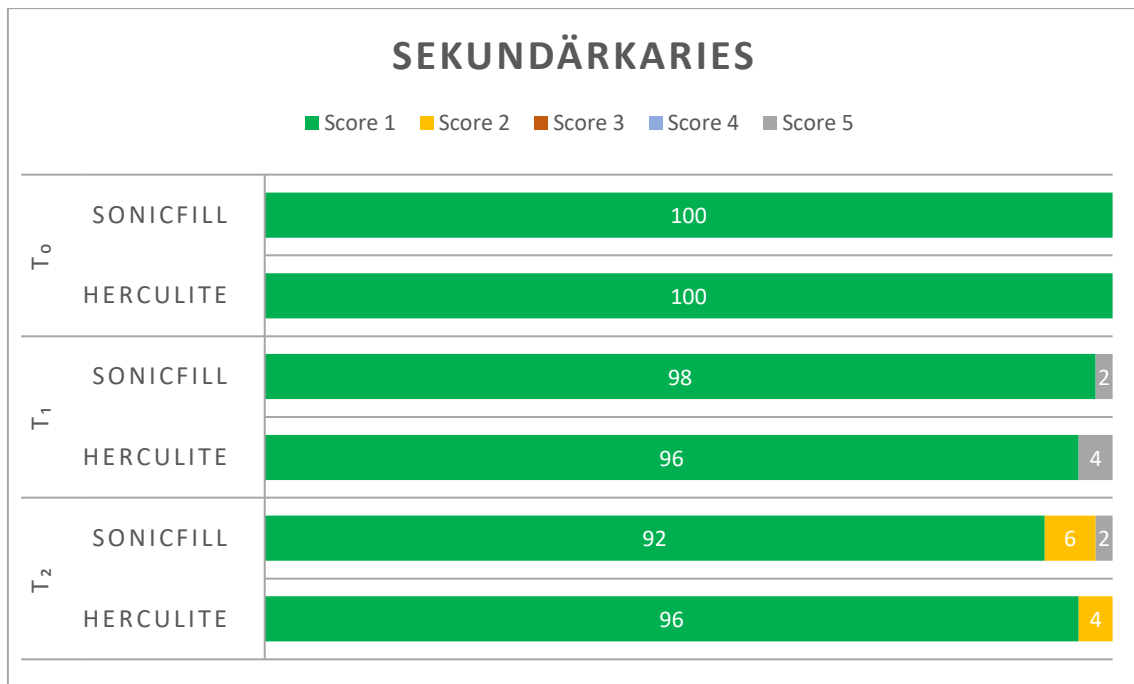


Abb. 64: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 12: Sekundärkaries in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

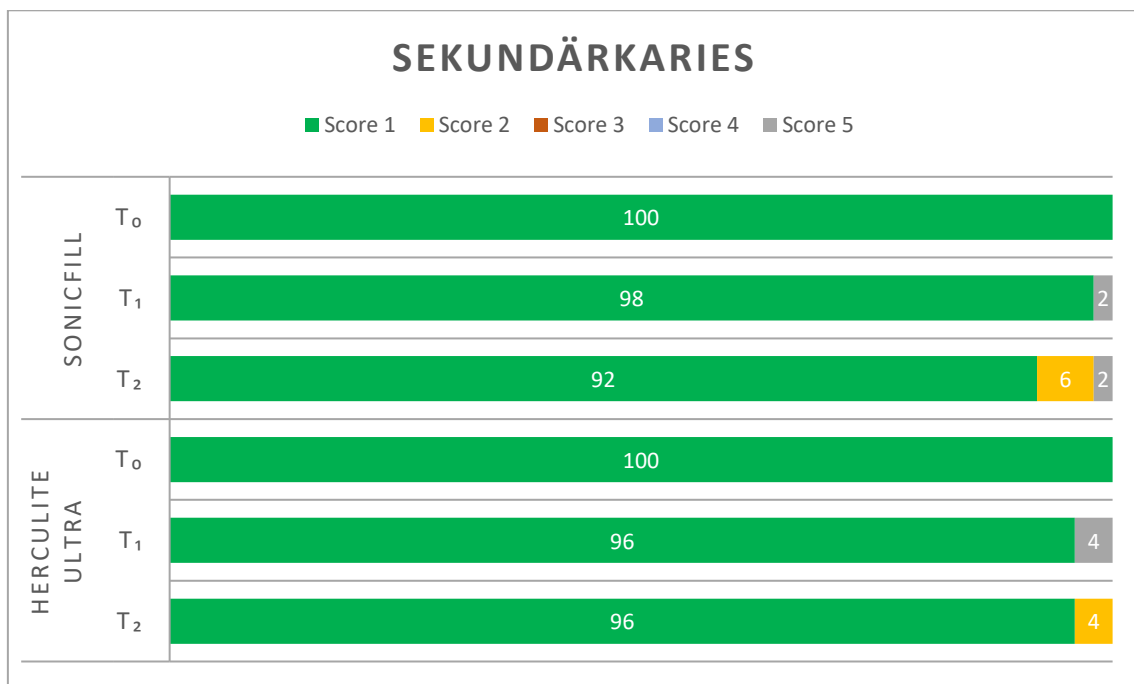


Abb. 65: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 12: Sekundärkaries in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf

5.3.3 FDI 13: Zahnintegrität

Bei der Beurteilung des Untersuchungskriteriums FDI 13: Zahnintegrität zeigte die Herculite-Gruppe zum Zeitpunkt T_1 statistisch signifikant bessere Ergebnisse als die SonicFill-Gruppe ($p < 0,05$). In beiden Materialgruppen war eine signifikante Verschlechterung über den Beobachtungszeitraum festzustellen ($p < 0,05$).

Tab. 39: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 13: Zahnintegrität zu den Zeitpunkten T_0 , T_1 , T_2

FDI 13: Zahnintegrität		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
T_0	SF	70	30	0	0	0
	HU	78	22	0	0	0
T_1	SF	0	80	20	0	0
	HU	0	90	10	0	0
T_2	SF	0	86	14	0	0
	HU	0	96	4	0	0

Tab. 40: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse FDI 13: Zahnintegrität in beiden Materialgruppen

FDI 13: Zahnintegrität		Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
SonicFill	T_0	70	30	0	0	0
	T_1	0	80	20	0	0
	T_2	0	86	14	0	0
Herculite XRV Ultra	T_0	78	22	0	0	0
	T_1	0	90	10	0	0
	T_2	0	96	4	0	0

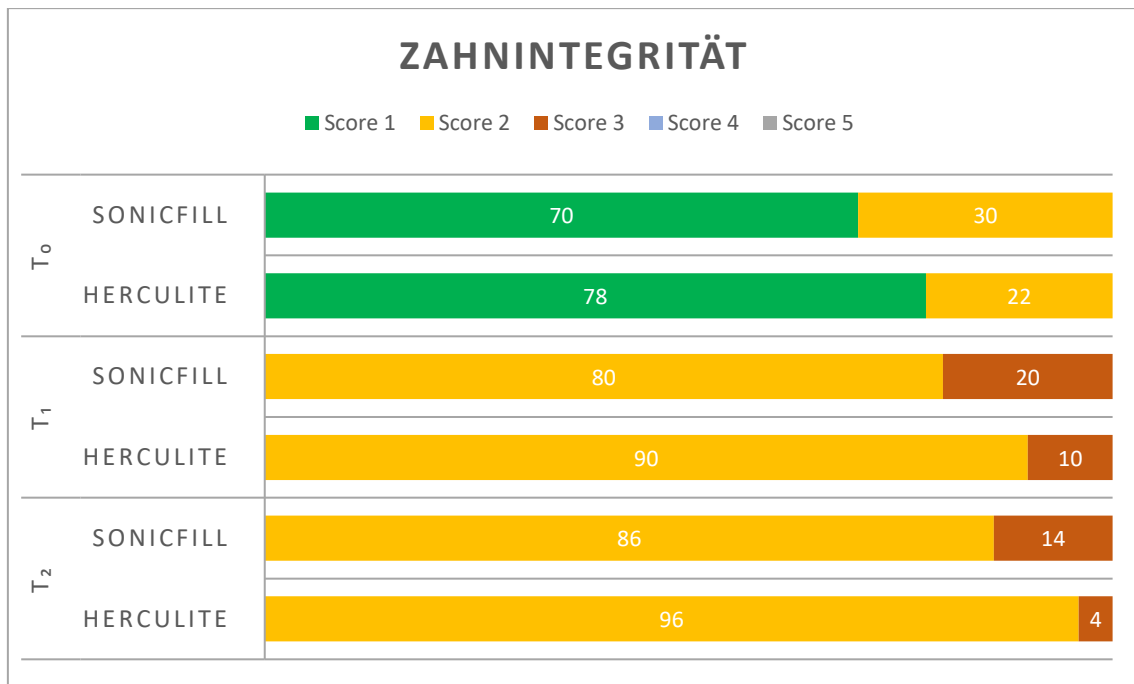


Abb. 66: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 13: Zahnintegrität in der Gegenüberstellung beider Materialgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T₀, T₁, T₂

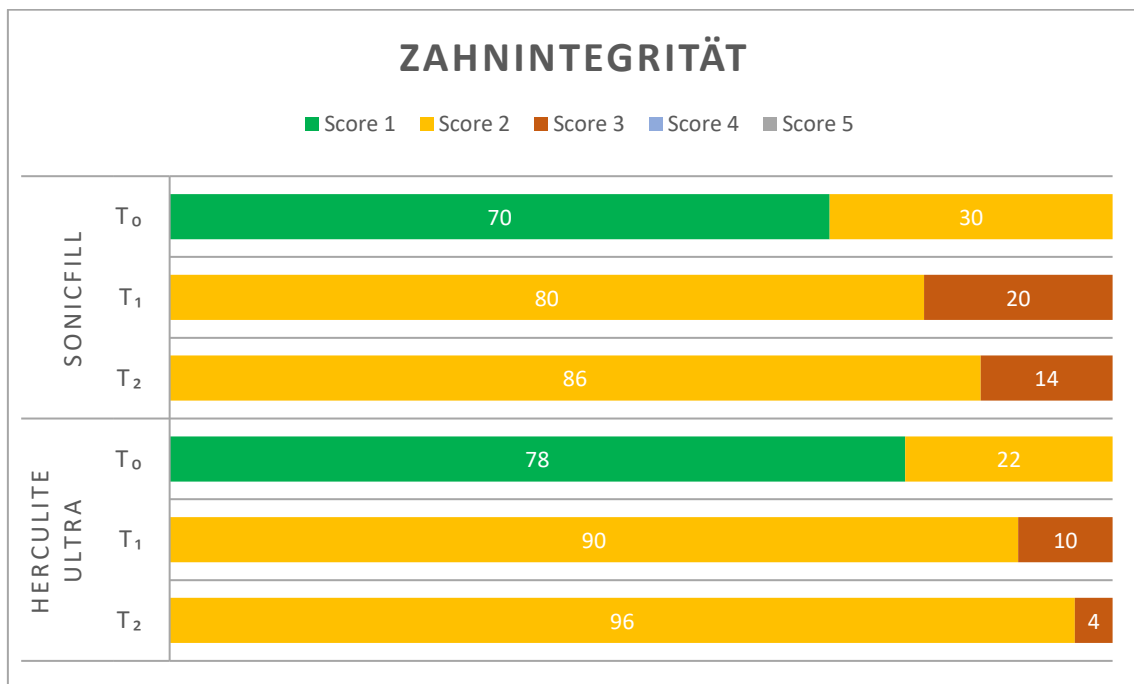


Abb. 67: Grafische Darstellung der Ergebnisse FDI 13: Zahnintegrität in beiden Materialgruppen im zeitlichen Verlauf



Abb. 68: FDI 13, Score 1: Füllung an 14 mod (SF): Totale Unversehrtheit

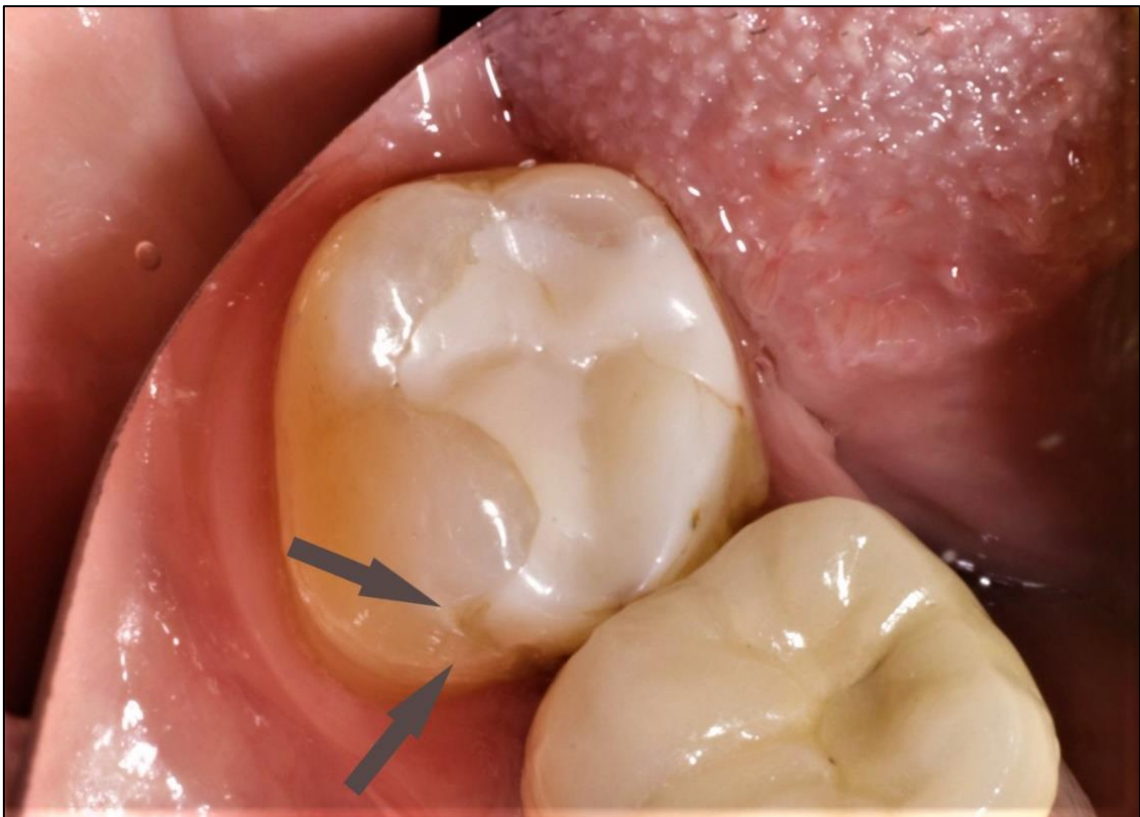


Abb. 69: FDI 13, Score 3: Füllung an 47 mo (HU): Schmelzdefekt und Riss > 250 µm, Schmelzchipping. Sichtbares Schmelzchipping im mesiobukkalen Kasten

6 Diskussion

In der vorliegenden Studie handelt es sich um eine kontrollierte, randomisierte, einfach verblindete Langzeitstudie im Split-Mouth-Design. Ziel der Studie war die klinische Performance eines schallaktivierten Bulk-Fill-Komposites mit einem klassischen, geschichteten Komposit in Klasse-II-Füllungen zu vergleichen. Nach neunjähriger Liegedauer wurden die untersuchten Füllungen anhand ausgewählter FDI-Kriterien bewertet. Als Bulk-Fill-Komposit wurde SonicFill ausgewählt, für die Kontrollgruppe stellvertretend für ein Komposit in Schichttechnik Herculite XRV Ultra. Im Rahmen einer vorangegangenen Untersuchung waren alle Füllungen nach 12 Monaten durch denselben Prüfer wie auch in dieser Arbeit nachuntersucht worden. Diese Daten wurden zur Auswertung mit herangezogen.

Zunächst soll das gewählte Studiendesign, die klinische Vorgehensweise, die Wahl der Bewertungskriterien sowie die Untersuchungsmethode kritisch diskutiert werden. Im Anschluss werden die ermittelten Ergebnisse in den Kontext des bisherigen Forschungsstandes gebracht. Die Frage, ob beide Füllungsmaterialien trotz unterschiedlicher Applikations- und Schichttechnik ein gleichwertiges Langzeitverhalten gezeigt haben und folglich die Nullhypothesen zutreffen, wird anhand der Studienergebnisse beantwortet.

6.1 Material- und Methodendiskussion

Der klinische Erfolg von Kompositrestaurationen ist von vielerlei Faktoren abhängig. Körner et al. [115] ermittelten in einer aktuellen Umfrage (2021) unter Zahnärzten, dass u.a. die Faktoren „Behandler“, „Material“ und „Patient“ Hauptgründe für das Misslingen einer Kompositrestauration waren. Der Patient als Empfänger nimmt mit seinem persönlichen Verhalten, wie der Mundhygiene und Ernährung, der individuellen Kariesaktivität und seiner Mitarbeit im Behandlungsprozess einen der Hauptfaktoren ein. Des Weiteren spielt der behandelnde Zahnarzt mit seinen individuellen Fähigkeiten, der präzisen und korrekten Anwendung der Materialien und der gewählten Schichttechnik eine wichtige Rolle. Meistens werden Fehler bei der Trockenlegung, der Anwendung der Adhäsivtechnik, Belichtung und Schichttechnik begangen [115]. Ebenso haben die verwendeten

Materialien mit ihren spezifischen Eigenschaften erheblichen Einfluss auf den Erfolg der Restauration.

6.1.1 Studiendesign

Die Studie wurde soweit wie möglich anhand den von Hickel et al. publizierten Empfehlungen für die Durchführung kontrollierter klinischer Studien mit Restaurationsmaterialien durchgeführt. Diese verlangen für klinisch-prospektive Studien neben einer Patientenselektion durch Ein- und Ausschlusskriterien auch eine Randomisierung. Die Restaurationen sollen von Ärzten mit langjähriger klinischer Erfahrung gelegt und von zwei kalibrierten Nachuntersuchern nach standardisierten Recallintervallen nachuntersucht werden [91].

Für eine belastbare Ergebnisinterpretation klinisch-prospektiver Studien ist eine hohe Transparenz im Studiendesign, der Durchführung wie auch der Analyse notwendig. Besonders zur Erstellung von Metaanalysen ist eine solche Nachvollziehbarkeit wichtig. In Vergleichsstudien ist dies leider nicht immer gegeben. So fehlten teilweise konkrete Angaben ob eine Randomisierung vorgenommen wurde [7, 80], ob bei den Nachuntersuchern eine Kalibrierung vorgenommen wurde [16] oder ob es sich bei den Behandlern um erfahrene Zahnärzte handelte [16, 47, 80]. Des Weiteren wurden die Methoden nicht präzise erläutert, so war nicht ersichtlich ob die Behandlungsabläufe vorher abgestimmt wurden [16, 18] und wie das Prozedere der Nachuntersuchung aussah [7, 16, 18, 195].

Durch randomisierte Studiendesigns können patientenabhängige Faktoren besser beherrscht und der Patient als statistische Einheit gewertet werden. Daher wird auch empfohlen, Zahnpaare der gleichen Zahngruppe mit ähnlichen kariösen Läsionen aus unterschiedlichen Quadranten zu bilden und randomisiert der Test- wie der Kontrollgruppe zuzuordnen [91]. Dies konnte in der vorliegenden Arbeit weitestgehend umgesetzt werden, lediglich bei drei nachuntersuchten Patienten bestand das Füllungspaar aus Prämolaren und Molaren. Die Nachuntersuchung wurde von einem sehr erfahrenen, anstatt von zwei kalibrierten Nachuntersuchern durchgeführt (siehe dazu 6.1.5). Die weiteren aufgeführten Kriterien konnten in dieser Studie alle erfüllt werden.

6.1.2 Patientenauswahl

Um den Einflussfaktor „Patient“ so gering wie möglich zu halten, wurden zahlreiche Ein- wie Ausschlusskriterien definiert. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass Veränderungen an den Füllungen möglichst ausschließlich in direktem Zusammenhang zur Füllungsmethode beruhten. Weiter sollten die Auswirkungen von z.B. einer hohen Kariesaktivität aufgrund mangelhafter Mundhygiene, oder eines hohen Abrasionspotentials durch eine CMD-Problematik wie Bruxismus ausgeschlossen werden. Naturgemäß ist eine absolute Angleichung aber nicht möglich. So wurden u.a. Ernährungsgewohnheiten nicht berücksichtigt, die zu vermehrten Verfärbungen führen können, wie z.B. Tabakkonsum oder Genuss stark verfärbender Lebensmittel. Auch ist nicht auszuschließen, dass Probanden über den langen Nachuntersuchungszeitraum einen Bruxismus oder eine ungenügende Mundhygiene entwickeln.

Hier liegt ein klarer Vorteil bei in-vitro Studien, da dort unter standardisierten Optimalbedingungen gearbeitet werden kann. Die Ergebnisse solcher Studien sind wertvoll und unverzichtbar, sind aber nur begrenzt mit den oralen Verhältnissen wie auch den Gegebenheiten in der zahnärztlichen Praxis vergleichbar. Klinischen Bedingungen und individuelle Fehlerquellen, wie z.B. eingeschränktes Sicht- und Arbeitsfeld, absolute Trockenlegung der Kavität und Compliance des Patienten, haben einen großen Einfluss auf die Qualität der Füllung. Um diese Fehlerquellen zu reduzieren wurden schwer zu erreichende Zähne, bei denen eine absolute Trockenlegung nicht möglich war, von vornherein nicht in die Studie aufgenommen. Solche Fehlerquellen können unter Laborbedingungen gänzlich ausgeschlossen werden.

Standards wie beispielsweise gleichgroße Kavitäten sind in der Praxis ebenso nicht umsetzbar, da sich die Größe einer Kavitätenpräparation stets an der Ausdehnung der Karies orientiert. Bei gleichförmiger Kavitätenpräparation besteht die Gefahr der Überpräparation oder das Belassen von Restkaries. Um dennoch vergleichbare Bedingungen zu schaffen, wurde in dieser Studie die Einschränkung auf Klasse-II-Kavitäten gewählt, ohne dabei eine definierte Flächenanzahl vorzugeben. Dies führte dazu, dass zwei- bis vierflächige Restaurationen mit in die Auswertung einbezogen wurden. Sinnvoll wäre es daher gewesen, eine konkrete Angabe an zugelassenen Füllungsflächen anzugeben. Im hiesigen Falle hätte sich dadurch aber die Zahl der Patienten und untersuchten

Restaurationen deutlich reduziert, wodurch möglicherweise die statistische Aussagekraft gelitten hätte.

In der vorliegenden Studie wurden zu Beginn 43 Patienten mit insgesamt 118 Restaurationen versorgt. Sowohl die Anzahl der Probanden als auch der angefertigten Restaurationen liegen dabei in vergleichbarer Größe zu anderen klinischen Studien, die Bulk-Fill-Komposite in Klasse-II-Kavitäten an bleibenden Zähnen untersuchten (Tab. 41). Zum Untersuchungszeitpunkt T₂ konnten 57 Restaurationen nachuntersucht werden, was einer Recallrate von 48,3 % entspricht. Verglichen mit anderen klinischen Langzeitstudien zur Langlebigkeit von Kompositrestaurationen mit Untersuchungszeiträumen von 8–10 Jahren ist dies eine geringere Recallrate [81, 117, 122, 160, 196]. Für eine aussagekräftige statistische Auswertung war sie dennoch ausreichend.

Der Großteil der nicht mehr teilnehmenden Probanden war weder telefonisch noch postalisch zu erreichen und daher nicht mehr verfügbar. Drei Probanden waren zu einer Teilnahme nicht bereit. Da es sich bei allen Probanden um Patienten zweier hauszahnärztlicher Praxen handelte, wurden im Vorhinein Patienten mit hoher Compliance, Zuverlässigkeit und Ortsansässigkeit ausgewählt. Da die zugrunde liegende Studie von 2011 auf 12 Monate ausgelegt war und danach keine regelmäßigen Nachuntersuchungen erfolgten, blieb eine enge Patientenbindung aus. Dies ist der Hauptgrund für die hohen Recallraten anderer Studien, in denen die Patienten teilweise jährlich zur Nachuntersuchung einbestellt wurden. So sind die sehr hohen Recallraten von teilweise 92 % nach sechs Jahren zu erklären. Zudem kam es im Zeitraum zwischen der Erststudie und der hier vorliegenden Nachuntersuchung zur Auflösung und Restrukturierung einer der beiden Praxen, wodurch ein Verlust einiger Studienteilnehmer nicht ausgeschlossen werden kann. Hier liegt der Vorteil klar bei Studien, die an zentralen und unabhängigen Stellen, wie z.B. Universitätskliniken, durchgeführt werden, da solche Veränderungsphänomene nahezu ausgeschlossen werden können. Der Vorteil der Durchführung in niedergelassenen Praxen liegt in der Tatsache, dass die Ergebnisse Rückschlüsse auf das Verhalten der Werkstoffe unter realen, praxisnahen Umständen erlauben, wie sie tagtäglich in den allgemein Zahnärztlichen Praxen vorherrschen.

Tab. 41: Übersicht über das Studiendesign bisheriger in-vivo-Studien zum klinischen Verhalten von Bulk-Fill-Kompositen in Klasse-II-Kavitäten an bleibenden Zähnen aufsteigend nach der Laufzeit

Arbeitsgruppe (Jahr)	Laufzeit	Anzahl Patienten	Anzahl Füllungen	Recallrate
Bayraktar et al. (2017) [23]	12 Monate	50	200	86%
Balkaja et al. (2019) [21]	12 Monate	54	109	94%
Colak et al. (2017) [47]	12 Monate	34	74	94 %
Akalin et al. (2018) [7]	24 Monate	52	111	100%
Atabek et al. (2017) [18]	24 Monate	30	60	100%
Arhun et al. (2010) [16]	24 Monate	31	82	83,9%
Guney et al. (2019) [80]	24 Monate	40	120	82,5%
Balkaja et al. (2020) [22]	24 Monate	54	109	44%
Van Dijken et al. (2014) [195]	36 Monate	38	106	98%
Van Dijken et al. (2015) [199]	36 Monate	86	200	98%
Yazici et al. (2017) [205]	36 Monate	50	104	78%
Van Dijken et al. (2016) [197]	5 Jahre	86	200	91%
Van Dijken et al. (2017) [198]	6 Jahre	38	106	92%
Heck et al. (2018) [86]	10 Jahre	43	96	58%

6.1.3 Klinische Vorgehensweise

Die untersuchten Füllungen wurden von drei sehr erfahrenen Behandlern gelegt, die über mehr als 10 Jahre Berufserfahrung verfügten. Frühere Studien, bei denen Füllungen von mehreren Behandlern gelegt wurden, konnten nicht ausschließen, dass der Einfluss des Behandlers auf die Ergebnisse größer war als der der getesteten Materialien

[19]. Durch vorher ausgegebene Flowcharts und vorgegebene Behandlungsabläufe sollte dieser Umstand verringert und eine hohe Standardisierung ermöglicht werden. Dadurch, dass die Behandlung im normalen Praxisalltag niedergelassener Behandler und nicht unter universitären oder labortechnischen Optimalbedingungen erfolgte (Wirksamkeitsstudie), erlaubt dies die Bewertung der Leistung der getesteten Materialien im praktischen Einsatz (Effektivitätsstudie) [59].

6.1.4 Bewertungskriterien

Bereits Anfang der 1970er Jahre hatte das United States Public Health Service (USPHS) einen Kriterienkatalog zur klinischen Beurteilung von Restaurationen herausgegeben, die auch als Ryge-Kriterien bekannt sind. Dieser Kriterienkatalog beinhaltete zu Anfang fünf Untersuchungspunkte mit einer drei- oder vierstufigen Bewertungsskala (Tab. 42) [176]. Seit der Einführung wurden die USPHS-Kriterien in einer Vielzahl von klinischen Studien verwendet und finden auch heute noch regelmäßige Anwendung. Anfänglich waren die Kriterien für Amalgam- und Goldfüllungen konzipiert worden. Im Laufe der Jahre wurden sie dann für die Evaluation von direkten Komposit- und indirekten Keramikrestaurationen um weitere Punkte erweitert und modifiziert (Tab. 42) [49]. Diese modifizierten USPHS-Kriterien gelten zwar weltweit als anerkannt, sind aber dennoch nicht einheitlich.

Tab. 42: Original und modifizierte USPHS-Kriterien

Original USPHS-Kriterien	Modifizierte USPHS-Kriterien (Auswahl)
<ul style="list-style-type: none"> – Farbübereinstimmung – Randverfärbung – anatomische Form – marginale Anpassung – Sekundärkaries 	<p>Zusätzlich zu den Originalkriterien:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Oberflächentextur – postoperative Überempfindlichkeit – approximaler Kontakt – okklusale Kontakte – Fraktur – und weitere
<p>Bewertet mit den Scores</p> <ul style="list-style-type: none"> – Alpha (exzellent) – Bravo (gut) – Charlie (insuffizient) – Delta (schlecht) 	

Ein weiteres Problem ist die relativ geringe Differenzierungsmöglichkeit zwischen zwei Bewertungsgraden, bedingt durch unpräzise Definitionen der einzelnen Bewertungsstufen, was zu einer verminderten Sensitivität führt [124]. Auch die Auswahl der einzelnen Bewertungskriterien erfolgt hauptsächlich durch subjektive Einschätzung [118]. Dies kann zu Missinterpretationen und uneinheitlichen Ergebnissen in den Studien führen, was sie schwer zu werten und vergleichen lässt.

Aufgrund dieser Problematiken wurden 2007 die FDI-Kriterien publiziert und 2010 nochmals aktualisiert. Diese beinhalten 16 klinisch relevante Bewertungskriterien mit einer fünfstufigen Skala (siehe auch Kap. 4.4.4) und eine Empfehlung hinsichtlich der Gestaltung und Durchführung klinischer Studien. Dadurch ist ein standardisiertes Vorgehen bei kontrollierten, klinischen Studien möglich [91]. Die 16 Kriterien unterteilen sich in drei Hauptkategorien: ästhetische (Unterkategorie A.1–A.4), funktionelle (B.5–B.10) und biologische Eigenschaften (C.11–C.13). Bewertet wird von Score 1–5, wobei 1–3 klinische Akzeptanz und 4–5 klinische Insuffizienz bedeutet. Score 4 gilt dabei als noch reparaturfähig und bei Score 5 ist ein kompletter Füllungsaustausch notwendig. Durch die fünfstufige Unterteilung und vorgegebene eindeutige Definition der Scores ist

eine genauere und einheitlichere Beurteilung der Restaurationen als durch die USPHS-Kriterien möglich, wodurch Unterschiede deutlicher hervortreten und eine höhere Sensitivität erreicht wird [129]. Die Verwendung der FDI-Kriterien findet zunehmend Anwendung. In 2010 lag der Anteil bei nur 4,5% aller klinischer Studie zu direkten Komposit-restaurationen, in 2016 stieg dieser Wert bereits auf 50% [129]. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Studien untereinander wäre es wünschenswert, dass sich die FDI-Kriterien als Standardmethode bei klinischen Studien zu modernen Adhäsivsystemen und Kompositen etablierten. Bei allen drei klinischen Vergleichsstudien zu SonicFill wurden modifizierte USPHS-Kriterien angewandt, was einen direkten Ergebnisabgleich unmöglich macht [7, 18, 23].

In der vorliegenden Studie wurden zehn der 16 FDI-Kriterien untersucht. Kriterium A.4 (Ästhetische anatomische Form) wurde nicht berücksichtigt, da dieser Punkt nur für direkt einsehbare Restaurationen, vornehmlich in der Front, angewendet werden soll. Die Untersuchung des Kriteriums B.7 (Okklusale Kontur und Verschleiß) ist nur bei Vorlage von Replikatmodellen der Baseline und deren Analyse im Labor beurteilbar und wurde daher ausgelassen. Unter Beachtung der Strahlenschutzverordnung und deren „ALARA“-Prinzip („As Low As Reasonably Achievable“) wurde auf die pauschale Anfertigung von Röntgenaufnahmen im Rahmen der Nachuntersuchung verzichtet (Kriterium B.9). Die FDI-Kriterien C.14–C.16 erfassen parodontologische Aspekte wie die Progredienz von Taschentiefen an den restaurierten Zähnen oder lokalallergische Reaktionen der Gingiva auf den verwendeten Komposit. Um eine Aussage zur Progredienz von Taschentiefen treffen zu können, ist eine dokumentierte Taschentiefenmessung bei Baseline Voraussetzung. Dies lag nicht vor und so war eine Berücksichtigung von C.14 (Parodontale Reaktionen) nicht möglich. Zur Beurteilung von C.15 (angrenzende Mukosa) fordern Hickel et al., dass zu dessen Beurteilung ein spezialisierter Untersucher hinzugezogen wird, da eine Unterscheidung zwischen allergischer Reaktion und lokaler Reizung sehr schwer ist [91]. C.16 beinhaltet die Prüfung der oralen und allgemeinen Gesundheit, was mit der vor Studienteilnahme aufgenommenen Anamnese abgedeckt war.

Für eine präzisere Darstellung des Einflusses von Füllkörpergröße und -gehalt auf die Oberflächengüte, den Verschleiß sowie die Randspaltqualität wäre eine Abformung der Restaurationen und der Replikatherstellung im Labor eine sinnvolle Ergänzung gewesen. Diese Modelle lassen sich im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersuchen

und so die exakte Größe der Randspalten bestimmen, wie es häufig bei in-vitro-Untersuchungen zum Randspaltverhalten angewandt wird [5, 8, 39, 171]. In der vorliegenden Studie konnte nur eine taktile wie visuelle Inspektion der Ränder vorgenommen werden. Da zur Beurteilung der Randadaptation nach den FDI-Kriterien aber nicht nur die Größe des Spaltes herangezogen wird, sondern auch klar sichtbare Faktoren wie weiße Linien, Randfrakturen oder freiliegendes Dentin, ist eine präzise Einordnung in die Scores auch ohne Ausmessung im REM möglich. Des Weiteren sind die für eine Sichtinspektion schwer einsehbaren approximalen Kästen auch bei einer Abformung meist nicht abgebildet, sodass der zusätzliche Aufwand einer Abdrucknahme den Wissensmehrgewinn nicht rechtfertigt. Diese Methode bleibt daher den in-vitro-Studien vorbehalten.

6.1.5 Nachuntersuchung

Für eine objektive Beurteilung des klinischen Erfolgs verschiedener Restaurationsmaterialien steht die Erfahrung des Untersuchers an erster Stelle. Die Wertung sollte anhand aktueller wissenschaftlicher Methoden erfolgen und möglichst von Untersuchern, die in die Füllungstherapie zuvor nicht involviert gewesen waren, durchgeführt werden. Hickel et al. empfehlen die Beurteilung der Restaurationen von mehreren kalibrierten Untersuchern nacheinander am gleichen Termin. Auftretende Meinungsverschiedenheiten sollen durch Diskussion behoben werden [91]. Dieses Vorgehen ist in der niedergelassenen Praxis schwer umsetzbar, da dort neben dem Studienvorhaben auch der wirtschaftliche Aspekt eine entscheidende Rolle spielt. Während der Nachuntersuchungen fand nahezu keine reguläre Behandlung praxisansässiger Patienten statt. Die Beurteilung durch einen weiteren Untersucher hätte die in Anspruch genommene Zeit der Praxisinhaber massiv verlängert. In diesem Zusammenhang ist deutlich darauf hinzuweisen, dass beide Praxen unentgeltlich ihre Räume zur Verfügung stellten und keine finanzielle Unterstützung seitens der Hersteller stattfand.

Alle Patienten, bis auf drei, wurden von dem Betreuer dieser Arbeit persönlich nachuntersucht. Diese drei Patienten konnten an den geplanten Untersuchungstagen nicht teilnehmen. Bei zweien lag eine aktuelle, hochwertige Fotodokumentation vor, welche zur Befundung herangezogen wurden. Ein Patient wurde von dem Behandler vor Ort nachuntersucht, der zuvor ausführlich anhand der Bewertungskriterien instruiert

wurde. Die erhobenen Ergebnisse wurden anhand der Fotodokumentation vom erfahrenen Prüfer nachkontrolliert.

6.1.6 Beobachtungszeitraum

Der in dieser Studie vorliegende Beobachtungszeitraum lag bei durchschnittlich 9 Jahren und einem Monat, bzw. 109 Monaten. Dies stellt eine vergleichsweise lange Liegedauer dar. Die überwiegende Mehrzahl der klinischen Studien zu Bulk-Fill-Kompositen besitzen Nachuntersuchungszeiträume von 12–36 Monaten (Tab. 41). Die vorliegenden Ergebnisse erlauben deshalb Rückschlüsse auf die Eignung der verwendeten Komposite hinsichtlich ihrer Langzeitanwendung. Das Interesse an Langzeitdaten ist enorm, deren Erhebung wird von vielen Autoren gefordert und müsste durch weitere Studien ausgebaut werden [15, 16, 23, 73, 200]. Der Nachteil von solch langen Nachbeobachtungszeiträumen, insbesondere in niedergelassenen Praxen, ist die sinkende Recallrate, bedingt durch Wohnortwechsel, ausbleibende Erreichbarkeit der Studienteilnehmer, Praxisauflösungen oder fehlendes Interesse an einer weiteren Studienteilnahme. Dem kann durch regelmäßige Nachuntersuchungstermine entgegengewirkt werden, um die Patientenbindung zu intensivieren und eine dauerhafte Erreichbarkeit zu generieren.

6.2 Ergebnisdiskussion

Grundsätzlich zeigten sich in beiden Untersuchungsgruppen in allen Untersuchungskategorien gute Ergebnisse. Es waren überschaubare Verluste in beiden Materialgruppen zu verzeichnen. Hinsichtlich der Randqualität zeigte Herculite XRV Ultra nach neun Jahren signifikant bessere Ergebnisse. SonicFill zeigte zum Zeitpunkt T₂ statistisch signifikant bessere Werte in der Untersuchung der Oberflächenverfärbung. Sowohl Herculite XRV Ultra als auch SonicFill verschlechterten sich signifikant in der Bewertung von Oberflächenglanz und Poren, Oberflächenverfärbung, Randverfärbung, Farbübereinstimmung und Transluzenz, marginale Randfraktur, Randspalt, Randdefizit und Zahnintegrität. In der Herculite-Gruppe war zusätzlich eine signifikante Verschlechterung in der Beurteilung von Materialfrakturen und Retention festzustellen. Trotz der Verschlechterungen innerhalb der Gruppen über den gesamten Beobachtungszeitraum waren alle Restaurationen, mit einer Ausnahme, auch nach neun Jahren noch als klinisch akzeptabel zu

bezeichnen. Dies zeigt eine ähnlich gute und zufriedenstellende Langzeitperformance beider Materialien und Schichttechniken.

Im Folgenden wird auf die evaluierten Ergebnisse genauer eingegangen.

6.2.1 Diskussion der ästhetischen Eigenschaften: FDI 1, 2 und 3

FDI 1: Oberflächenglanz und Poren

In der Beurteilung der FDI-Kriterien 1 (Oberflächenglanz und Poren) konnte zwischen beiden Materialien kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) festgestellt werden. In beiden Gruppen war im zeitlichen Verlauf eine signifikante Verschlechterung des Oberflächenglanzes und der Poren zu beobachten ($p < 0,05$).

Nanohybridfüllerkomposite, zu welchen sowohl SonicFill als auch Herculite XRV Ultra zählen, gelten als sehr gut polierbar bei gleichzeitig guten mechanischen Eigenschaften [128, 135]. Durch die Beimengung an Nanopartikeln wird die organische Matrix deutlich reduziert, was zu besseren mechanischen Eigenschaften führt [126]. Die Schallaktivierung bei SonicFill ermöglicht ein blasenfreies Einfüllen, was zu einer Reduktion oberflächlicher Poren beiträgt. Bei der Schichtung von Herculite XRV Ultra besteht die Gefahr der Lufteinschlüsse zwischen den einzelnen Schichten, sodass es im Laufe der Jahre durch okklusale Abnutzung zur Eröffnung oberflächlicher Poren kommen kann (siehe Abb. 22). SonicFill besitzt einen erhöhten Fülleranteil im Vergleich zu Herculite XRV Ultra, was sich in einem verminderten Oberflächenglanz zeigte, allerdings im nicht signifikanten Bereich. Beide Materialien zeigten trotz einer Verschlechterung auch nach neun Jahren noch einen akzeptablen und zufriedenstellenden Oberflächenglanz.

FDI 2a: Oberflächenverfärbung

Hinsichtlich der Oberflächenverfärbung zeigte SonicFill zum Zeitpunkt T_2 statistisch signifikant bessere Werte als die Herculite-Gruppe ($p < 0,05$). Beide Materialien verzeichneten im Beobachtungszeitraum eine signifikante Verschlechterung in dieser Kategorie.

Durch den hohen Füllergehalt von SonicFill und seine Nanohybridstruktur ist eine hohe Oberflächengüte zu erreichen, die sich klinisch in einer guten Polierbarkeit und Abrasionsfestigkeit zeigt. Die Entstehung von Oberflächenverfärbungen steht in direktem Zusammenhang zur Oberflächenglätte [89]. Die evaluierten Ergebnisse könnten daher als Bestätigung einer hohen Polierbarkeit verstanden werden. Da allerdings im

Kriterium Oberflächenglanz keine Überlegenheit von SonicFill festgestellt werden konnte, kann eine direkte Korrelation mit der Oberflächengüte nicht hergestellt werden.

Die zweite Nullhypothese konnte demnach teilweise bestätigt werden.

FDI 2b: Randverfärbung

Die Auswertung des Kriteriums FDI 2b (Randverfärbung) zeigte signifikant bessere Werte in der Herculite-Gruppe zum Zeitpunkt T_2 ($p < 0,05$). Beide Materialien zeigten im zeitlichen Verlauf eine signifikante Zunahme der Randverfärbungen ($p < 0,05$).

Randverfärbungen entstehen durch eine Defektbildung an der Grenzfläche zwischen Zahn und Komposit. Ursächlich dafür sind ein unzureichendes Bonding, eine mangelnde Adaption, ungenügende Politur oder hohe Schrumpfkraften. Generell lässt die Randqualität im Laufe der Jahre aufgrund physiologischer und chemischer Interaktionen im oralen Milieu nach, demzufolge können Randverfärbungen auch im Sinne des natürlicher Alterungsprozesses einer Füllung vorkommen [7]. Sie können aber auch ein Zeichen für einen beginnenden Haftungsverlust sein. Die inkrementelle Schichttechnik ermöglicht ein gezieltes Anpressen des Komposits an die Kavitätenränder auf dem darunter liegenden Gegenlager der vorherigen Schicht, was eine optimale Randadaption erleichtert. Bei SonicFill ist dies durch die einzeitige Applikation nur eingeschränkt möglich. Durch die Schallaktivierung wird allerdings über die Reduzierung der Viskosität ein eigenständiges Anfließen des Komposits an die Kavitätenwände ähnlich der Flowables erreicht. Eine gleichwertige Randadaption von SonicFill zu geschichteten Kompositen wurde in zahlreichen in-vitro-Studien gezeigt [5, 8, 9, 39, 74, 82, 85, 144, 162, 181, 187], konnte allerdings anhand der vorliegenden klinischen Ergebnisse nicht bestätigt werden. Bayraktar et al. [23], Akalin et al. [7] und auch Atabek et al. [18] konnten in ihren klinischen Studien nach 12 bzw. 24 Monaten keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Rand- sowie Oberflächenverfärbungen zwischen beiden untersuchten Materialien feststellen. Die Signifikanz in der vorliegenden Arbeit lag erst zum Zeitpunkt T_2 vor, sodass die Ergebnisse von Bayraktar, Akalin und Atabek bestätigt werden konnten. Eine Zunahme von Randverfärbungen bei anhaltender Liegedauer im nicht signifikanten Bereich stellten Atabek et al. wie auch Akalin et al. fest. Die vorliegenden Daten bestätigen diese Zunahme von Randverfärbungen in beiden Untersuchungsgruppen und im statistisch signifikanten Bereich ($p < 0,05$), dennoch war das Ausmaß an Randverfärbungen

überschaubar und im klinisch akzeptablen Bereich. Über einen langen Beobachtungszeitraum betrachtet zeigte sich folglich die manuelle Adaption des Komposits der eigenständigen, durch Schallaktivierung unterstützen Adaption überlegen.

Die dritte Nullhypothese konnte bezüglich der Randverfärbungen folglich nicht bestätigt werden.

FDI 3: Farbübereinstimmung und Transluzenz

Hinsichtlich der Farbübereinstimmung und Transluzenz (FDI 3) konnte zum Zeitpunkt T_0 ein signifikanter Unterschied ($p < 0,05$) festgestellt werden. Herculite XRV Ultra zeigte zur Baseline bessere Ergebnisse als SonicFill. Mit zunehmender Liegedauer war keine Signifikanz mehr nachzuweisen. Beide Materialien zeigten im zeitlichen Verlauf eine signifikante Verschlechterung der Farbübereinstimmung und Transluzenz ($p < 0,05$).

Konventionelle Inkrementkomposite wie Herculite XRV Ultra werden in einem deutlich größeren Farbspektrum angeboten, was eine individuelle Farbanpassung mit Dentin- und Schmelzfarben ermöglicht. Bulkfill-Komposite sind für eine gesteigerte Durchhärtungstiefe häufig transluzenter, so auch SonicFill. Deshalb muss mit kleineren ästhetischen Einbußen gerechnet werden, was aber im Hinblick auf Seitenzahnrestaurationen toleriert werden kann. Die höhere Transluzenz von SonicFill zeigte sich klinisch hingegen häufig mit einem besseren Chamäleonereffekt, sodass sich die Restaurationen oft harmonisch in den Zahn eingliederten und es zu keinem ästhetischen Nachteil kam (siehe bspw. Abb. 16, 35, 39). Die ausbleibende Signifikanz im zeitlichen Verlauf im Vergleich zwischen den Gruppen und zunehmende Verschlechterung bei beiden Materialien lässt sich auf die Änderung der Zahnfarbe durch extrinsische und intrinsische Faktoren, sowie durch die ebenso festgestellte Zunahme an Oberflächenverfärbungen zurückführen. Trotz dieser Farbunterschiede lagen die Abweichungen in beiden Gruppen innerhalb eines tolerierbaren Ausmaßes.

Die erste Nullhypothese konnte dementsprechend bestätigt werden.

6.2.2 Diskussion der funktionellen Eigenschaften: FDI 5, 6, 8 und 10

FDI 5: Materialfraktur und Retention

Bisherige in-vitro-Studien belegten eine Vereinfachung in der Füllungstherapie mittels Bulk-Fill-Kompositen aufgrund ihrer zeitsparenden und weniger sensitiven Anwendung. Auch hinsichtlich der materialspezifischen Eigenschaften wurde eine Vielzahl von Bulk-Fill-Kompositen untersucht, mit vielversprechenden Ergebnissen (siehe Kap. 2.2.7/2.2.8). Dennoch sind diese Erkenntnisse nur bedingt auf die klinische Performance zu übertragen, da Laborbedingungen nicht direkt mit denen im Praxisalltag verglichen werden können. Klinische Studien bilden folglich immer das unverzichtbare Instrument zur endgültigen Beurteilung eines Werkstoffes [116]. In dieser Hinsicht sind insbesondere die Langzeitstudien mit Laufzeiten von mehr als 24 Monaten relevant. Krämer et al. [116] empfehlen auf der Grundlage eigener Untersuchungen einen Mindestuntersuchungszeitraum von 2 Jahren für dentale Komposite. Fehler im Behandlungsablauf, wie eine Kontamination mit Speichel oder Blut, ungenügende Belichtung mit unvollständiger Durchhärtung des Komposits, Missachtung oder Fehleinschätzung von C-Faktor und Kavitätendesign, führen zu einem relativ frühen Versagen der Restaurationen innerhalb der ersten 24 Monate. Ist dieser Zeitraum überstanden ist die Langzeitprognose sehr gut [116]. Dieser Umstand lässt sich mit den vorliegenden Studienergebnissen bestätigen. Fehler im Behandlungsablauf, welcher Art auch immer, führten zu einem frühen Füllungsverlust von je drei Restaurationen pro Materialgruppe zum Untersuchungszeitpunkt T₁. Bis zur Nachuntersuchung nach insgesamt neun Jahren waren in beiden Gruppen weitere, aber überschaubare Verluste zu verzeichnen (SF: n=5, HU: n=2). Es lag zu allen Untersuchungszeitpunkten kein signifikanter Unterschied ($p>0,05$) hinsichtlich der Verlustrate der Restaurationen vor. Zwei Restaurationen (SF: n=1, HU: n=1) zeigten Materialabplatzungen, wovon bei einer der Approximalkontakt mit beeinträchtigt war. Die Appliziermethode hat also keinen Einfluss auf die Überlebens- und Frakturnrate einer Restauration. Die niedrige Anzahl der Verluste bestätigt die gute Leitung und Eignung beider Komposite für den Langzeitgebrauch. Die Anzahl an Verlusten lag im selben Ausmaß wie bei zwei vergleichbaren Langzeitstudien [86, 198], folglich konnte die vorliegende Studie bereits evaluierte Daten bisheriger Langzeituntersuchungen bestätigen.

Die vierte Nullhypothese konnte demnach bestätigt werden.

FDI 6: Randqualität

Hinsichtlich der Kriterien zur Beurteilung der Randqualität (marginale Randfraktur (FDI 6a), Randspalt (FDI 6b) und Randdefizit (6c)) war zum Nachuntersuchungszeitpunkt T₂ ein signifikanter Unterschied festzustellen ($p < 0,05$), wobei Herculite XRV Ultra bessere Ergebnisse zeigte. Dies ist auf eine Restauration in der SonicFill-Gruppe zurückzuführen, die eine Massenfraktur zeigte und folglich in allen Kriterien der Kategorie FDI 6 die Bewertung Score 5 erhielt (Abb. 45). Bei beiden Materialien war im zeitlichen Verlauf eine signifikante Verschlechterung der Randqualitäten festzustellen ($p < 0,05$).

Die dritte Nullhypothese konnte bezogen auf die Beurteilung der Randqualität nicht bestätigt werden.

Bei SonicFill und Herculite XRV Ultra handelt es sich, wie in Kapitel 2.3 ausführlich erläutert, um zwei Komposite mit unterschiedlichem Schrumpfungsverhalten. Eine höhere Polymerisationsschrumpfung hat Einfluss auf die Randqualität und führt bei hoher Krafteinwirkung auf die Kavitätenwände zu Schmelzfrakturen und in der Folge zu Füllungs- und Zahnfrakturen. Bei sehr hohen Schrumpfungskräften, die die Haftung an der Zahnoberfläche überschreiten, löst sich im Zuge der Polymerisation das Komposit von der Zahnhartsubstanz – Randspalten, -frakturen und -defizite sind die Folge [12]. Ebenso kann das spezifische E-Modul des Komposits die Entstehung von Schmelz- und Füllungsfrakturen begünstigen. Heintze et al. [87] konnten darstellen, dass das E-Modul als Indikator für eine gute Materialbeständigkeit unter Belastung verwendet werden kann und mit einer langen klinischen Überlebenswahrscheinlichkeit korreliert. Bei einem niedrigen E-Modul können die bei okklusaler Belastung auftretenden Kräfte nicht vom Komposit kompensiert werden und werden daher auf die Außenwände abgeleitet, die sich dadurch deformieren. Solche Deformitäten zeigen sich klinisch in Randdefiziten und -spalten [87]. Dem gegenüber steht ein hohes E-Modul für Werkstoffe, die den hohen Kaubelastungen standhalten können und daher lange klinischen Überlebenszeiten zeigen. Sowohl SonicFill als auch Herculite XRV Ultra besitzen ein weit über den 80 MPa gefordertes E-Modul nach ISO 4049:2009 [79]. Klinische Studien zur Randqualität von SonicFill bestätigen die guten physikalischen Eigenschaften aus bisherigen in-vitro-Studien [2, 4, 5, 39, 51, 57, 74, 76]. Ebenso konnten sie bei einem Untersuchungszeitraum von bis zu 24 Monaten keinen signifikanten Unterschied zu Inkrementkompositen

hinsichtlich der Randqualität und Retention feststellen [7, 18, 23]. Diese Erkenntnis kann die vorliegende Studie bestätigen. Bei zunehmender Liegedauer zeigte das Schichtkomposit Herculite XRV Ultra aber signifikant bessere Werte. Da dies auf eine Restauration zurückzuführen ist, die eine ungünstige Dimensionierung sowie Restwandstärke zeigte, kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch bei der Versorgung mit einem Inkrementkomposit eine Fraktur aufgetreten wäre. Eine Nicht-Eignung oder ungenügende Performance von SonicFill kann aus diesem Grund nicht hergeleitet werden. Denn trotz der Signifikanz zeigten, mit Ausnahme der einen frakturierten SonicFill-Füllung, alle Restaurationen beider Gruppen eine klinisch zufriedenstellende Randqualität mit Bewertungen innerhalb der Scores 1-3.

FDI 8a: Approximalkontakt

Die Beurteilung des Approximalkontaktes zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen ($p>0,05$). Es war zudem keine signifikante Verschlechterung über den gesamten Beobachtungszeitraum in der SonicFill- wie auch der Herculite-Gruppe auszumachen ($p>0,05$).

Bei der herkömmlichen Inkrementtechnik ist es aufgrund der schrittweisen Applikation möglich, durch ein Anpressen der Matrize an den Nachbarzahn während der Belichtung der tieferen Schichten den Kontaktpunkt zusätzlich zu verstärken. Dies ist bei der One-Bulk-Technik nicht möglich. In dieser Situation ist es daher hier besonders wichtig, die Matrize vorher zu bombieren und an den Nachbarzahn zu adaptieren. Bei schwieriger Kontaktpunktlage (weiter Approximalraum, tief subgingivale Präparationsgrenze) muss für einen suffizienten Kontakt zum Nachbarzahn als auch hinsichtlich der Aushärtungstiefe bei Verwendung eines Bulk-Fills in mindestens zwei Schichten gearbeitet werden. Folglich ist auch dann eine direkte Kontaktpunktgestaltung möglich und ist nicht abhängig von der Wahl des Komposits, sondern der Situation geschuldet als auch des verwendeten Matrizensystems (vorgeformte Matrizen mit Separierring und -keilen versus glatte Matrizen ohne zusätzliche Verwendung von Separierkeilen o.ä.) [56]. Da tief subgingivale Kavitäten als auch Zähne ohne Kontakt zum Nachbarzahn unter Beachtung der Einschlusskriterien nicht untersucht wurden, und zudem in beiden Gruppen dasselbe Matrizensystem verwendet wurde, waren signifikante Unterschiede hinsichtlich des Approximalkontaktes nicht zu erwarten. Die gleichwertigen Approximalkontakte in der SonicFill-Gruppe verglichen mit der Kontrollgruppe bestätigt die von El-Shamy et al.

[56] gefundenen in-vitro-Ergebnisse, in denen SonicFill-Restaurationen gleichwertige Approximalkontakte zeigten wie die Füllungen in Inkrementtechnik.

FDI 10: Patientensicht

Unter dem Untersuchungspunkt Patientensicht wurde die Zufriedenheit der Patienten hinsichtlich der Ästhetik der Restaurationen, der Funktion sowie des Behandlungsprozederes abgefragt. Unter dieser Kategorie wurde auch das durchgeführte visual analog scale zu Aufbiss- und Temperaturempfindlichkeiten geführt. In allen aufgeführten Punkten gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen beiden Untersuchungsgruppen ($p > 0,05$). Die Patientenzufriedenheit betrug zu jedem Zeitpunkt 100%, keiner der Patienten gab Aufbiss- oder Temperaturempfindlichkeiten an.

Die hohe Zufriedenheit bezüglich des Behandlungsprozederes zeigt, dass beide Behandlungsmethoden seitens der Patienten als gleichwertig und angenehm empfunden wurden. Durch die Schichttechnik nimmt der Füllungsprozess mit Herculite XRV Ultra mehr Zeit ein als die Bulk-Technik mit SonicFill, der höhere Zeitaufwand wurde aber nicht als unverhältnismäßig angesehen. Während der Schallaktivierung von SonicFill kommt es kurzzeitig zu einer hochfrequenten Schallexposition, ähnlich der Frequenz während der Anwendung von Ultraschall-Zahnsteinentfernungsgeräten. Da dies nur über wenige Sekunden der Fall ist, hatte es keinen Einfluss auf die Patientenzufriedenheit. Hinsichtlich der Funktion gab es ebenso keine Beanstandungen durch die Patienten. Da die Füllungen von sehr erfahrenen Behandlern gelegt wurden, wurde viel Wert auf eine funktionsgetreue und anatoforme Gestaltung gelegt und alle Restaurationen in der statischen wie dynamischen Okklusion kontrolliert. Dadurch ist eine hohe Funktionstüchtigkeit gewährleistet, Über- oder Fehlbelastungen der Zähne aufgrund von Vorkontakten mit folgenden Aufbisschmerzen oder in später Folge Ermüdungsbrüchen werden vermieden [204]. Die Beurteilung der Ästhetik in den FDI-Kriterien zielt insbesondere auf Frontzahnrestaurationen ab und kann daher bei Seitenzahnrestaurationen aus Patientensicht vernachlässigt werden. Die Restaurationen liegen meist außerhalb des Sichtbereiches, folglich ist der Stellenwert der Ästhetik geringer als bei Frontzahnrestaurationen.

Die Tatsache, dass keiner der Patienten angab, an Aufbiss- oder Temperaturempfindlichkeiten zu leiden, zeigt einerseits die gut eingestellte Funktion der Restaurationen durch die Behandler, aber auch die gute Performance des verwendeten Adhäsivsystems

Optibond FL. Daraus resultiert die gute Versiegelung der Dentinfläche, welche bei einer fehlerhaften Anwendung des Adhäsivsystems häufiger zu postoperativen Hypersensitivitäten führt (vgl. dazu 6.2.3, FDI 11). Diese Ergebnisse stehen in Einklang zu den gefundenen Resultaten hinsichtlich des Auftretens postoperativer Hypersensitivitäten.

6.2.3 Diskussion der biologischen Eigenschaften: FDI 11, 12 und 13

FDI 11: Postoperative Hypersensitivitäten und Vitalität

Bei der Betrachtung des Kriteriums FDI 11 ließen sich zwischen den beiden Füllungsgruppen keine Unterschiede feststellen. Zu keinem Zeitpunkt lag ein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Auftretens postoperativer Hypersensitivitäten und der Vitalität vor ($p > 0,05$).

Die zum Zeitpunkt T_1 berichteten postoperativen Hypersensitivitäten führten bei beiden Gruppen zu je einer endodontischen Behandlung. Zum Zeitpunkt T_2 waren keine postoperativen Hypersensitivitäten mehr zu verzeichnen. Dies war zu erwarten, da nach einer derart langen Verweildauer ein (Wieder-) Auftreten derselben praktisch auszuschließen ist. Solche Symptome klingen nach Untersuchungen von Briso et al. [34] meist innerhalb von 90 Tagen ab. Ebenso verhält es sich bei den subjektiven Beschwerden auf Temperaturreize oder Aufbissbeschwerden.

Diese Schmerzsymptomatik kann eine Folge von Mikrorandspalten sein, die durch eine Ablösung der Restauration bei zu hohen Schrumpfungskräften oder bei ungenügender Primäradaptation entstehen. Ebenso können sie eine Folge des Versagens der Dentinhaftung bei fehlerhafter Verarbeitung des Bondingsystems oder einer Kontamination der Kavität mit Feuchtigkeit während der Bonding-Applikation sein [83]. Bei der mangelhaften Versiegelung der Dentinoberfläche (im Sinne einer Überätzung oder bei Missachtung des wet-bondings, siehe auch Kapitel 2.1.3) entsteht durch die Schrumpfungskräfte ein Unterdruck, durch welchen Dentinliquor in den Komposit-Dentin-Zwischenraum gezogen wird. Bei okklusaler Belastung, Kontakt zu dem Dentinliquor gegenüber hyperosmolaren Flüssigkeiten oder Temperaturreizen kommt es zu Flüssigkeitsverschiebungen in den Dentinkanälchen, welche den Schmerzreiz auslösen. Das Auftreten postoperativer Hypersensitivitäten steht folglich in direktem Zusammenhang zum Schrumpfungsverhalten des verwendeten Komposits und dem verwendeten Adhäsivsystem.

In beiden Untersuchungsgruppen wurde Optibond FL als Adhäsivsystem verwendet, welches aufgrund seiner auf Wasser basierten Formal für die wet-bonding-Problematik weniger anfällig ist [66]. Somit kann kein kausaler Zusammenhang zwischen dem verwendeten Adhäsivsystem und dem Auftreten postoperativer Hypersensitivitäten hergestellt werden. Der zweite relevante Einflussfaktor, die Polymerisationsschrumpfung, ist bei SonicFill mit 1,6% deutlich geringer im Vergleich zu Herculite XRV Ultra (2,7%). Die Tatsache, dass es keinen signifikanten Unterschied im Auftreten postoperativer Hypersensitivitäten gab, bestätigt die hohe Konversionsrate und Aushärtungstiefe von SonicFill auch in tiefen Kavitäten und die geringen Zugkräfte auf die Adhäsivfläche [2, 84]. Bei der Betrachtung der Konversionsrate und Aushärtungstiefe ist zu beachten, dass aufgrund der nicht festgelegten Kavitätdimensionen in vollständig exkaviertem Zustand unterschiedliche Kavitätentiefen vorlagen. Dies hat zur Folge, dass die maximale Schichtdicke von SonicFill von 5 mm nicht überall vorlag. In flacheren Bereichen, wie im okklusalen Kasten, hat die höhere Konversionsrate und Aushärtungstiefe also keinen Einfluss auf die hier evaluierten Untersuchungskriterien.

Die inkrementelle Schichtung von Herculite XRV Ultra erlaubt eine Berücksichtigung des C-Faktors, so können bei sorgfältiger Verarbeitung die Schrumpfkkräfte auf die Kavitätenwände trotz höherer Polymerisationsschrumpfung reduziert und in der Folge die Wahrscheinlichkeit des Auftretens postoperativer Hypersensibilitäten minimiert werden [184]. Dem gegenüber steht die Aussage mehrerer Autoren, dass weder die Wahl des Adhäsivsystems (self-etch/Etch&rinse/Universaladhäsiv) noch des Komposits und seiner Schichttechnik (Inkrementtechnik/Bulk-Fill) Einfluss auf die Häufigkeit des Auftretens postoperativer Hypersensitivitäten hat [48, 188]. Hinsichtlich des Einflusses der Schichttechnik konnte diese Aussage in der vorliegenden Studie bestätigt werden. Auch die bisher publizierten klinischen Studien zu SonicFill konnten keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich des Auftretens postoperativer Hypersensitivitäten feststellen [7, 18, 23].

Die vierte Nullhypothese konnte bestätigt werden.

FDI 12: Sekundärkaries

Hinsichtlich des Bewertungskriteriums FDI 12: Sekundärkaries konnte zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied zwischen den Materialgruppen ermittelt werden ($p > 0,05$). In beiden Gruppen war im Beobachtungszeitraum keine signifikante Zunahme an Sekundärkaries festzustellen ($p > 0,05$).

Sekundärkaries ist wie bereits mehrfach erläutert die klinische Folge von Randspalten, Randdefiziten oder dem Verlust der Verankerung der Restauration im Dentin-Kompositverbund (s. Kap. 2.3, 2.2.1, 2.2.3). Die dadurch entstehenden Mikrospalten bieten ein optimales Milieu für kariogene Prozesse und können dort ungehindert, oftmals auch unbemerkt ablaufen. In der Folge kann es zu massiven Zahnhartsubstanzverlusten kommen. Die Tatsache, dass kein Unterschied zwischen beiden Untersuchungsgruppen als auch im zeitlichen Verlauf festgestellt werden konnte, spricht abermals für die sehr gute klinische Leistung von Optibond FL, bestätigt aber auch die geringen Zugkräfte auf die Haftfläche im Rahmen der Polymerisationsschrumpfung sowohl von Herculite XRV Ultra als auch von SonicFill. Dies konnte bereits in in-vitro-Studien festgestellt werden und wird durch die hier gefundenen Ergebnisse untermauert [51, 57, 142, 147, 194]. Gleiches konnte in den bisherigen in-vivo-Studien herausgearbeitet werden [7, 18, 23]. Ebenso bekräftigt dieser Untersuchungspunkt, dass die Randqualität beider Materialien als gut zu bezeichnen ist und trotz signifikanter Unterschiede zwischen den Untersuchungsgruppen keinen Einfluss auf das Auftreten von Sekundärkaries hatte.

Die dritte Nullhypothese konnte bezüglich der Sekundärkaries bestätigt werden.

FDI 13: Zahnintegrität

Bei der Beurteilung des Untersuchungskriteriums FDI 13: Zahnintegrität zeigte die Herculite-Gruppe zum Zeitpunkt T_1 statistisch signifikant bessere Ergebnisse als die SonicFill-Gruppe ($p < 0,05$). In beiden Materialgruppen war eine signifikante Verschlechterung über den Beobachtungszeitraum festzustellen ($p < 0,05$).

In dieser Kategorie wurden alle Restaurationen auf Schmelzrisse oder -frakturen hin untersucht. Diese entstehen durch hohe Zugkräfte auf die Zahnwände während der Polymerisation, ohne dass der Schmelz-Komposit-Verbund dabei beeinträchtigt wird. Ebenso können bei zunehmender Liegedauer Ermüdungsrisse sichtbar werden [182]. Begünstigt wird das Auftreten von Schmelzrissen durch überdimensionierte Kavitäten

und eine hohe Polymerisationsschrumpfung [25]. Um Randabplatzungen zu vermeiden, wurde u.a. die Schmelzrandanschrägung eingeführt, welche allerdings noch aus der Zeit der Zementunterfüllungen stammt, als kein zufriedenstellender Verbund mit der Dentinfläche erreicht werden konnte. Durch die Abschrägung der Schmelzränder werden die Schmelzprismen horizontal geschnitten und so die Verbundfläche vergrößert als auch eine tiefere Demineralisation gefördert [66]. Da aufgrund moderner Adhäsivsysteme eine explizite Anschrägung nicht mehr notwendig ist, sondern lediglich ein Brechen der dünnen Schmelzränder empfohlen wird, wurde sie in dieser Studie nicht mit einbezogen [151].

Die statistisch signifikant besseren Ergebnisse von Herculite nach einem Jahr können auf die bessere manuelle Adaption an die Kavitätenränder und mögliche Berücksichtigung des C-Faktors zurückgeführt werden (s. 6.2.2, FDI 6: Randqualität). Trotz der Signifikanz ist der Unterschied zwischen beiden Gruppen als gering zu bezeichnen und lag bei allen Restaurationen im klinischen guten Bereich. Zum Untersuchungszeitpunkt T₂ war eine Signifikanz nicht mehr festzustellen. Dies ist auf die gesunkenen Recallrate zurückzuführen, wodurch nicht alle Füllungen nachuntersucht werden konnten.

Die Verschlechterung der Integrität im zeitlichen Verlauf ist auf Ermüdungserscheinungen zurückzuführen und lag bei allen nachuntersuchten Restaurationen noch immer im klinisch guten Bereich (Wertung mit Score 2 und 3).

6.3 Schlussfolgerung

Insgesamt betrachtet zeigte die vorliegende Studie eine gute klinische Langzeitperformance von SonicFill und Herculite XRV Ultra. Das Bulk-Fill-Komposit SonicFill ist folglich ebenso für die langfristige Versorgung von Seitenzahnkavitäten geeignet wie ein klassisch geschichtetes Inkrementkomposit. Die vorliegende Studie bestätigt die bisherige Studienlage zum Langzeitverhalten von Bulk-Fill-Kompositen, dennoch sollte die Durchführung weiterer in-vivo-Langzeitstudien verfolgt werden, um die aktuelle Datenlage zu ergänzen und bisherige Ergebnisse zu evaluieren.

7 Zusammenfassungen

7.1 Zusammenfassung (deutsch)

Ziel

Ziel dieser klinisch-prospektiven Studie war die Evaluation des klinischen Langzeitverhaltens des schallaktivierbaren Bulk-Fill-Komposits SonicFill im Vergleich zum konventionellen Inkrementkomposit Herculite XRV Ultra nach neun Jahren Liegedauer. Da SonicFill durch seine ultraschallaktivierte Applikation eine Sonderstellung in der Gruppe der Bulk-Fill-Komposite einnimmt, sind bislang nur wenige Studien mit einem Untersuchungszeitraum über 2 Jahre hinaus verfügbar. Die Nachuntersuchungen erfolgten zu Baseline, nach 12 Monaten sowie nach neun Jahren anhand der 2010 von Hickel et al. überarbeiteten FDI-Kriterien durch einen erfahrenen Prüfer.

Material und Methode

43 Patienten (Durchschnittsalter 48,9 Jahre) erhielten im Jahre 2011 im Split-Mouth-Design 118 direkte Kompositrestaurationen (SF: n=64, HU: n=54). Die Restaurationen wurden von drei erfahrenen Zahnärzten in zwei niedergelassenen Zahnarztpraxen gelegt. Für alle Restaurationen wurde Optibond FL im Etch&rinse-Verfahren verwendet. SonicFill wurde in einem einzigen Inkrement von maximal 5mm eingebracht und für 40 Sekunden lichtgehärtet. Bei Herculite XRV Ultra erfolgte eine konventionelle Schichtung in 2mm Inkrementen mit einer Belichtung von 40 Sekunden je Schicht. Die statistische Auswertung wurde mit SPSS anhand des Mann-Whitney U- und des Friedman-Tests durchgeführt.

Ergebnisse

Nach neun Jahren konnten bei 23 Patienten 57 Restaurationen (SF: n=32, HU: n=25) nachuntersucht werden, die Recallrate betrug 48,3%. Nach 12 Monaten mussten in beiden Gruppen je drei Restaurationen ausgetauscht werden. Insgesamt waren nach neun Jahren in der SonicFill-Gruppe 8, in der Herculite-Gruppe 5 Verluste zu verzeichnen. Hinsichtlich der Verlustrate konnte kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Materialgruppen festgestellt werden ($p=0,093$).

Beide Gruppen zeigten im zeitlichen Verlauf signifikante Verschlechterungen ($p < 0,05$) in folgenden Untersuchungskriterien: Oberflächenglanz und Poren, Oberflächenverfärbung, Randverfärbung, Farbübereinstimmung und Transluzenz, marginale Randfraktur, Randspalt, Randdefizit und Zahnintegrität. In der Herculite-Gruppe war zusätzlich eine signifikante Verschlechterung in der Beurteilung von Materialfrakturen und Retention festzustellen. Trotz der Verschlechterungen zeigte alle Restaurationen eine insgesamt gute klinische Performance.

Im Gruppenvergleich konnten zu Baseline statistisch signifikant bessere Werte in der Herculite-Gruppe hinsichtlich der Farbanpassung und Transluzenz festgestellt werden ($p < 0,05$). Zudem zeigte Herculite XRV Ultra im 12-Monats-Recall signifikant bessere Werte bezüglich der Zahnintegrität als die SonicFill-Gruppe. Nach neun Jahren ergaben sich statistisch signifikant bessere Werte in der Herculite-Gruppe bei der Randqualität (Randverfärbung, -fraktur, -spalt, -defizit), sowie in der SonicFill-Gruppe hinsichtlich der Oberflächenverfärbung. Die Patientenzufriedenheit betrug zu jedem Untersuchungszeitpunkt 100%.

Schlussfolgerung

Sowohl das Bulk-Fill-Komposit SonicFill als auch das Inkrementkomposit Herculite XRV Ultra zeigten nach neunjähriger Liegedauer eine gute klinische Performance. Bezüglich der Verlustraten war keine Signifikanz in der Gegenüberstellung der untersuchten Materialgruppen festzustellen. Herculite XRV Ultra konnte nach neun Jahren in der Beurteilung der Randqualität signifikant bessere Ergebnisse nachgewiesen werden. Dennoch ist das klinische Langzeitverhalten beider Materialien als gut und vergleichbar zu sehen. Da bisher nur wenige in-vivo-Studien zur Beurteilung von Bulk-Fill-Kompositen, insbesondere von SonicFill, durchgeführt wurden, sollte die weitere Untersuchung von Bulk-Fill-Kompositrestaurationen durch vor allem klinischen Langzeitstudien verfolgt werden.

7.2 Abstract

Objectives

The objective of this prospective clinical trial was to evaluate the long-term clinical behavior of the sonically activated bulk-fill composite SonicFill in comparison to the conventional resin composite Herculite XRV Ultra after nine years of clinical service. Although SonicFill represents an exceptional pathway in the group of bulk-fill composites due to its ultrasound-activated application, only a few studies with an investigation period longer of > 2 years are available so far. Follow-up examinations were carried out at baseline, after 12 months and after nine years using the FDI criteria according to Hickel et al. by an experienced examiner.

Material and methods

In 2011 forty three patients (mean age 48.9 years) received 118 direct composite restorations in a split-mouth design (SF: n=64, HU: n=54). The restorations were placed by three experienced dentists in two private dental practices. OptibondFL was used in etch&rinse mode for all restorations. SonicFill was applied in a single increment of maximum 5mm and light cured for 40 s. With Herculite XRV Ultra, conventional layering was performed in 2mm increments having been light cured 40 s per layer. The statistical evaluation was carried out with SPSS using Mann-Whitney U and the Friedman tests.

Results

After nine years, 57 restorations (SF: n=32, HU: n=25) were examined in 23 patients, the recall rate was 48.3%. After 12 months three restorations in each group had to be replaced. Overall after nine years there were 8 failures in the SonicFill group and 5 in the Herculite group. Regarding failure rates, no significant difference between the two material groups could be determined ($p=0.093$).

Both groups showed significant deterioration ($p<0.05$) regarding the following criteria: Surface gloss and pores, surface discoloration, marginal discoloration, color match and translucency, marginal fracture, marginal gap, marginal defect, and tooth integrity. In the Herculite group, there was also a significant deterioration in material fractures and retention. Despite the deterioration, all restorations showed an overall good clinical performance.

At baseline, compared to the SonicFill group, statistically significantly better values were found in the Herculite group with regard to color matching and translucency ($p < 0.05$). In addition, Herculite XRV Ultra showed significantly better values in terms of tooth integrity than the SonicFill group in the 12-month recall. After nine years there were statistically significantly better values in the Herculite group for marginal quality (marginal discoloration, fracture, gap, defects) and in the SonicFill group for surface discoloration. Patient satisfaction was 100% throughout the clinical trial.

Conclusion

Both the bulk-fill composite SonicFill and the incremental composite Herculite XRV Ultra showed a good clinical performance after nine years of clinical service. Concerning the failure rates, no significant difference was found between groups. Herculite XRV Ultra showed significantly better results for marginal quality after nine years. Nevertheless, the long-term clinical behavior of both materials can be rated as good and comparable. Since only a few clinical long-term data for the assessment of bulk-fill composites, especially SonicFill, are available so far, further investigations of bulk-fill composite restorations should be followed up by long-term clinical trials in particular.

8 Literatur

1. Abbasi M, Moradi Z, Mirzaei M, Kharazifard MJ, Rezaei S (2018) Polymerization Shrinkage of Five Bulk-Fill Composite Resins in Comparison with a Conventional Composite Resin. *J Dent (Tehran)* 15(6):365–374
2. Abdelaziz KM, Saleh AA (2018) Influence of adhesive-composite application modalities on their bonding to tooth structure and resistance of the performed restorations to failure. *J Dent Sci* 13(4):378–385. doi:10.1016/j.jds.2018.08.003
3. Abouelleil H, Pradelle N, Villat C, Attik N, Colon P, Grosgeat B (2015) Comparison of mechanical properties of a new fiber reinforced composite and bulk filling composites. *Restor Dent Endod* 40(4):262–270. doi:10.5395/rde.2015.40.4.262
4. Agarwal PM, Taneja S, Kumar M (2017) To evaluate and compare the effect of different light-curing modes and different liners on cuspal deflection in premolar teeth restored with bulk filled or incrementally filled composite measured at different time intervals. *J Conserv Dent* 20(5):317–321. doi:10.4103/JCD.JCD_328_16
5. Agarwal RS, Hiremath H, Agarwal J, Garg A (2015) Evaluation of cervical marginal and internal adaptation using newer bulk fill composites. An in vitro study. *J Conserv Dent* 18(1):56–61. doi:10.4103/0972-0707.148897
6. Ahmed MH, Yao C, van Landuyt K, Peumans M, van Meerbeek B (2020) Extra Bonding Layer Compensates Universal Adhesive's Thin Film Thickness. *J Adhes Dent* 22(5):483–501. doi:10.3290/j.jad.a45179
7. Akalın TT, Bozkurt FO, Kusdemir M, Özsoy A, Özcan M (2018) Clinical Evaluation of Sonic-Activated High Viscosity Bulk-Fill Nanohybrid Resin Composite Restorations in Class II Cavities. A Prospective Clinical Study up to 2 Years. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 26(3):152–160. doi:10.1922/EJPRD_01620Akalın09
8. Al-Harbi F, Kaisarly D, Michna A, ArRejaie A, Bader D, El Gezawi M (2015) Cervical Interfacial Bonding Effectiveness of Class II Bulk Versus Incremental Fill Resin Composite Restorations. *Oper Dent* 40(6):622–635. doi:10.2341/14-152-L
9. Al-Harbi F, Kaisarly D, Bader D, El Gezawi M (2016) Marginal Integrity of Bulk Versus Incremental Fill Class II Composite Restorations. *Oper Dent* 41(2):146–156. doi:10.2341/14-306-L

10. Alkhudhairy F (2017) Wear Resistance of Bulk-fill Composite Resin Restorative Materials Polymerized under different Curing Intensities. *J Contemp Dent Pract* 18(1):39–43. doi:10.5005/jp-journals-10024-1985
11. Alkhudhairy FI (2017) The effect of curing intensity on mechanical properties of different bulk-fill composite resins. *Clin Cosmet Investig Dent* 9:1–6. doi:10.2147/CCIDE.S130085
12. Almeida LJDS, Penha KJdS, Souza AF, Lula ECO, Magalhães FC, Lima DM, Firoozmand LM (2017) Is there correlation between polymerization shrinkage, gap formation, and void in bulk fill composites? A μ CT study. *Braz Oral Res* 31:e100. doi:10.1590/1807-3107bor-2017.vol31.0100
13. Almeida Junior LJDS, Lula ECdO, Penha KJdS, Correia VS, Magalhães FAC, Lima DM, Firoozmand LM (2018) Polymerization Shrinkage of Bulk Fill Composites and its Correlation with Bond Strength. *Braz Dent J* 29(3):261–267. doi:10.1590/0103-6440201801838
14. Alrahlah A, Silikas N, Watts DC (2014) Post-cure depth of cure of bulk fill dental resin-composites. *Dent Mater* 30(2):149–154. doi:10.1016/j.dental.2013.10.011
15. Arbildo-Vega HI, Lapinska B, Panda S, Lamas-Lara C, Khan AS, Lukomska-Szymanska M (2020) Clinical Effectiveness of Bulk-Fill and Conventional Resin Composite Restorations: Systematic Review and Meta-Analysis. *Polymers* 12(8). doi:10.3390/polym12081786
16. Arhun N, Celik C, Yamanel K (2010) Clinical evaluation of resin-based composites in posterior restorations: two-year results. *Oper Dent* 35(4):397–404. doi:10.2341/09-345-C
17. Asmussen E, Peutzfeldt A (1998) Influence of UEDMA BisGMA and TEGDMA on selected mechanical properties of experimental resin composites. *Dent Mater* 14(1):51–56. doi:10.1016/s0109-5641(98)00009-8
18. Atabek D, Aktaş N, Sakaryali D, Bani M (2017) Two-year clinical performance of sonic-resin placement system in posterior restorations. *Quintessence Int* 48(9):743–751. doi:10.3290/j.qi.a38855.
19. Auschill TM, Koch CA, Wolkewitz M, Hellwig E, Arweiler NB (2009) Occurrence and causing stimuli of postoperative sensitivity in composite restorations. *Oper Dent* 34(1):3–10. doi:10.2341/08-7

20. Awiszus R, Kunzelmann K-H (2017) Randspaltanalyse von Füllungen mit Bulk Fill-Kompositen. Dissertation, Universitätsbibliothek der Ludwig-Maximilians-Universität
21. Balkaya H, Arslan S, Pala K (2019) A randomized, prospective clinical study evaluating effectiveness of a bulk-fill composite resin, a conventional composite resin and a reinforced glass ionomer in Class II cavities. One-year results. *J Appl Oral Sci* 27:e20180678. doi:10.1590/1678-7757-2018-0678
22. Balkaya H, Arslan S (2020) A Two-year Clinical Comparison of Three Different Restorative Materials in Class II Cavities. *Oper Dent* 45(1):E32-E42. doi:10.2341/19-078-C
23. Bayraktar Y, Ercan E, Hamidi MM, Çolak H (2017) One-year clinical evaluation of different types of bulk-fill composites. *J Investig Clin Dent* 8(2). doi:10.1111/jicd.12210
24. Behr M, Belli R, Boccaccini AR, Forstreuter J, Frankenberger R, Gbureck U (2018) Werkstoffkunde in der Zahnmedizin. Moderne Materialien und Technologien : 442 Abbildungen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York
25. Bhandari S (2021) Facts About Cracks in Teeth. *Prim Dent J* 10(1):20–27. doi:10.1177/2050168420980987
26. Bhatia TK, Asrani H, Banga H, Jain A, Rawlani SS (2015) Influence of salivary contamination on the dentin bond strength of two different seventh generation adhesive systems. In vitro study. *J Conserv Dent* 18(6):467–470. doi:10.4103/0972-0707.168811
27. Blunck U, Ilie N (2019) Lichtpolymerisation heute. *zm* (23-24):48–58
28. Borchers L, Eichner K, Kappert HF, Borchers L (2005) Grundlagen und Verarbeitung, 8. Aufl. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, / begr. von Karl Eichner. Fortgef. von Heinrich F. Kappert ; Bd. 1. Thieme, Stuttgart
29. Bouillaguet S, Gysi P, Wataha JC, Ciucchi B, Cattani M, Godin C, Meyer JM (2001) Bond strength of composite to dentin using conventional, one-step, and self-etching adhesive systems. *J Dent* 29(1):55–61. doi:10.1016/s0300-5712(00)00049-x
30. Bowen RL (1963) Properties of a silica-reinforced polymer for dental restorations. *J Am Dent Assoc* 66:57–64. doi:10.14219/jada.archive.1963.0010

31. Bowen RL, Nemoto K, Rapson JE (1983) Adhesive bonding of various materials to hard tooth tissues: forces developing in composite materials during hardening. *J Am Dent Assoc* 106(4):475–477. doi:10.14219/jada.archive.1983.0078
32. Braga RR, Ferracane JL (2004) Alternatives in polymerization contraction stress management. *Crit Rev Oral Biol Med* 15(3):176–184. doi:10.1177/154411130401500306
33. Braga RR, Ballester RY, Ferracane JL (2005) Factors involved in the development of polymerization shrinkage stress in resin-composites. A systematic review. *Dent Mater* 21(10):962–970. doi:10.1016/j.dental.2005.04.018
34. Briso ALF, Mestrener SR, Delício G, Sundfeld RH, Bedran-Russo AK, Alexandre RS de, Ambrosano GMB (2007) Clinical assessment of postoperative sensitivity in posterior composite restorations. *Oper Dent* 32(5):421–426. doi:10.2341/06-141
35. Bucuta S, Ilie N (2014) Light transmittance and micro-mechanical properties of bulk fill vs. conventional resin based composites. *Clin Oral Investig* 18(8):1991–2000. doi:10.1007/s00784-013-1177-y
36. Buonocore MG (1955) A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res* 34(6):849–853. doi:10.1177/00220345550340060801
37. Buonocore MG, Quigley M (1958) Bonding of synthetic resin material to human dentin. Preliminary histological study of the bond area. *J Am Dent Assoc* 57(6):807–811. doi:10.14219/jada.archive.1958.0229
38. Burke FJ (2003) From extension for prevention to prevention of extension: (minimal intervention dentistry). *Dent Update* 30(9):492-8, 500, 502. doi:10.12968/denu.2003.30.9.492
39. Campos EA, Ardu S, Lefever D, Jassé FF, Bortolotto T, Krejci I (2014) Marginal adaptation of class II cavities restored with bulk-fill composites. *J Dent* 42(5):575–581. doi:10.1016/j.jdent.2014.02.007
40. Cardoso MV, Almeida Neves A de, Mine A, Coutinho E, van Landuyt K, Munck J de, van Meerbeek B (2011) Current aspects on bonding effectiveness and stability in adhesive dentistry. *Aust Dent J* 56 Suppl 1:31–44. doi:10.1111/j.1834-7819.2011.01294.x

41. Çelik Ç, Arhun N, Yamanel K (2014) Clinical evaluation of resin-based composites in posterior restorations: a 3-year study. *Med Princ Pract* 23(5):453–459.
doi:10.1159/000364874
42. Cheung GS (1990) Reducing marginal leakage of posterior composite resin restorations: a review of clinical techniques. *J Prosthet Dent* 63(3):286–288.
doi:10.1016/0022-3913(90)90196-j
43. Cholakow-Bodechtel C (2016) Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS V). Materialienreihe / Institut der Deutschen Zahnärzte, Band 35. Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV, Köln
44. Chung KH (1990) The relationship between composition and properties of posterior resin composites. *J Dent Res* 69(3):852–856.
doi:10.1177/00220345900690030401
45. Cidreira Boaro LC, Pereira Lopes D, Souza ASC de, Lie Nakano E, Ayala Perez MD, Pfeifer CS, Gonçalves F (2019) Clinical performance and chemical-physical properties of bulk fill composites resin -a systematic review and meta-analysis. *Dent Mater* 35(10):e249-e264. doi:10.1016/j.dental.2019.07.007
46. Colak H, Ercan E, Hamidi MM (2016) Shear bond strength of bulk-fill and nano-restorative materials to dentin. *Eur J Dent* 10(1):40–45. doi:10.4103/1305-7456.175697
47. Colak H, Tokay U, Uzgur R, Hamidi MM, Ercan E (2017) A prospective, randomized, double-blind clinical trial of one nano-hybrid and one high-viscosity bulk-fill composite restorative systems in class II cavities. 12 months results. *Niger J Clin Pract* 20(7):822–831. doi:10.4103/1119-3077.212449
48. Costa T, Rezende M, Sakamoto A, Bittencourt B, Dalzochio P, Loguercio AD, Reis A (2017) Influence of Adhesive Type and Placement Technique on Postoperative Sensitivity in Posterior Composite Restorations. *Oper Dent* 42(2):143–154.
doi:10.2341/16-010-C
49. Cvar JF, Ryge G (2005) Reprint of criteria for the clinical evaluation of dental restorative materials. 1971. *Clin Oral Investig* 9(4):215–232. doi:10.1007/s00784-005-0018-z

50. Demarco FF, Corrêa MB, Cenci MS, Moraes RR, Opdam NJM (2012) Longevity of posterior composite restorations: not only a matter of materials. *Dent Mater* 28(1):87–101. doi:10.1016/j.dental.2011.09.003
51. Demirel G, Baltacioglu IH, Kolsuz ME, Ocak M, Bilecenoglu B, Orhan K (2019) Volumetric Cuspal Deflection of Premolars Restored With Different Paste-like Bulk-fill Resin Composites Evaluated by Microcomputed Tomography. *Oper Dent*. doi:10.2341/19-019-L
52. Dewaele M, Truffier-Boutry D, Devaux J, Leloup G (2006) Volume contraction in photocured dental resins. The shrinkage-conversion relationship revisited. *Dent Mater* 22(4):359–365. doi:10.1016/j.dental.2005.03.014
53. DGZMK S2k Leitlinie Kariesprophylaxe bei bleibenden Zähnen – grundlegende Empfehlungen
54. Douglas WH (1989) Clinical status of dentine bonding agents. *J Dent* 17(5):209–215. doi:10.1016/0300-5712(89)90166-8
55. Eames WB, Strain JD, Weitman RT, Williams AK (1974) Clinical comparison of composite, amalgam, and silicate restorations. *J Am Dent Assoc* 89(5):1111–1117. doi:10.14219/jada.archive.1974.0556
56. El-Shamy H, Sonbul H, Alturkestani N, Tashkandi A, Loomans BA, Dörfer C, El-Badrawy W (2019) Proximal contact tightness of class II bulk-fill composite resin restorations. An in vitro study. *Dent Mater J* 38(1):96–100. doi:10.4012/dmj.2017-279
57. Elsharkasi MM, Platt JA, Cook NB, Yassen GH, Matis BA (2018) Cuspal Deflection in Premolar Teeth Restored with Bulk-Fill Resin-Based Composite Materials. *Oper Dent* 43(1):E1-E9. doi:10.2341/16-072-L
58. Emami N, Söderholm K-JM (2003) How light irradiance and curing time affect monomer conversion in light-cured resin composites. *Eur J Oral Sci* 111(6):536–542. doi:10.1111/j.0909-8836.2003.00082.x
59. FDI World Dental Federation (2017) Recommendations for Clinical Trials of Restorative Materials. <https://www.fdiworlddental.org/resources/policy-statements-and-resolutions/recommendations-for-clinical-trials-of-restorative>. Zugegriffen: 07. Februar 2021.340Z
60. Federlin M (2017) Erfolgreich einsetzbar – klinisch bewährt. *zm* (3)

61. Ferracane JL (2011) Resin composite--state of the art. *Dent Mater* 27(1):29–38. doi:10.1016/j.dental.2010.10.020
62. Frankenberger R (2006) Bonding 2006 – Zeitersparnis versus Langzeiterfolg. *Quinessen* 57:485–495
63. Frankenberger R, Krämer N, Petschelt A (1999) Fatigue behaviour of different dentin adhesives. *Clin Oral Investig* 3(1):11–17. doi:10.1007/s007840050072
64. Frankenberger R, Perdigão J, Rosa BT, Lopes M (2001) "No-bottle" vs "multi-bottle" dentin adhesives--a microtensile bond strength and morphological study. *Dent Mater* 17(5):373–380. doi:10.1016/s0109-5641(00)00084-1
65. Frankenberger R, Strobel W. O., Taschner M., Krämer N., Petschelt A. (2004) Total Etch vs. Self-Etch - Evaluation klassischer Parameter unterschiedlicher Adhäsivsysteme. *ZWR* 113(5):188–196. doi:10.1055/s-2004-828626
66. Frankenberger R (2010) Adhäsiv-Fibel. Adhäsive Zahnmedizin - Wege zum klinischen Erfolg, 2. Aufl. Spitta-Abrechnung. Spitta-Verl., Balingen
67. Frankenberger R (2018) Adhäsive. *ZWR* 127(06):300–304. doi:10.1055/a-0622-5599
68. Frankenberger R, Blunck U (Hrsg) (2013) Adhäsive Zahnheilkunde. Wissenschaft und Praxis ; mit 16 Tabellen ; [mit 3D-Brille]. Dt. Zahnärzte-Verl., Köln
69. Frankenberger R, Tay FR (2005) Self-etch vs etch-and-rinse adhesives. Effect of thermo-mechanical fatigue loading on marginal quality of bonded resin composite restorations. *Dent Mater* 21(5):397–412. doi:10.1016/j.dental.2004.07.005
70. Frankenberger R, Lohbauer U, Roggendorf MJ, Naumann M, Taschner M (2008) Selective enamel etching reconsidered: better than etch-and-rinse and self-etch? *J Adhes Dent* 10(5):339–344
71. Frankenberger R, Dudek M-C, Winter J, Braun A, Krämer N, Stein-Lausnitz M von, Roggendorf MJ (2020) Amalgam Alternatives Critically Evaluated: Effect of Long-term Thermomechanical Loading on Marginal Quality, Wear, and Fracture Behavior. *J Adhes Dent* 22(1):107–116. doi:10.3290/j.jad.a44001
72. Frankenberger R, Roggendorf MJ, Koch A, Dudek M-C (2020) Ist die "Battle-of-the-Bottles" vorbei? *zm* 110(1-2):42–46

73. Fron Chabouis H, Smail Faugeron V, Attal J-P (2013) Clinical efficacy of composite versus ceramic inlays and onlays: a systematic review. *Dent Mater* 29(12):1209–1218. doi:10.1016/j.dental.2013.09.009
74. Furness A, Tadros MY, Looney SW, Rueggeberg FA (2014) Effect of bulk/incremental fill on internal gap formation of bulk-fill composites. *J Dent* 42(4):439–449. doi:10.1016/j.jdent.2014.01.005
75. Gaintantzopoulou MD, Gopinath VK, Zinelis S (2017) Evaluation of cavity wall adaptation of bulk esthetic materials to restore class II cavities in primary molars. *Clin Oral Investig* 21(4):1063–1070. doi:10.1007/s00784-016-1848-6
76. Garcia D, Yaman P, Dennison J, Neiva G (2014) Polymerization shrinkage and depth of cure of bulk fill flowable composite resins. *Oper Dent* 39(4):441–448. doi:10.2341/12-484-L
77. Gente M, Willamowski M (2018) Zahnärztliche Werkstoffkunde. Praxisorientiertes und praxiswirksames Expertenwissen für Studierende der Zahnmedizin, Zahntechniker und Zahnärzte. Spitta, Balingen
78. Goracci C, Sadek FT, Monticelli F, Cardoso PEC, Ferrari M (2004) Microtensile bond strength of self-etching adhesives to enamel and dentin. *J Adhes Dent* 6(4):313–318
79. Goracci C, Cadenaro M, Fontanive L, Giangrosso G, Juloski J, Vichi A, Ferrari M (2014) Polymerization efficiency and flexural strength of low-stress restorative composites. *Dent Mater* 30(6):688–694. doi:10.1016/j.dental.2014.03.006
80. Guney T, Yazici AR (2019) 24-Month Clinical Evaluation of Different Bulk-Fill Restorative Resins in Class II Restorations. *Oper Dent*. doi:10.2341/18-144-C
81. Gurgan S, Kutuk ZB, Yalcin Cakir F, Ergin E (2020) A randomized controlled 10 years follow up of a glass ionomer restorative material in class I and class II cavities. *J Dent* 94:103175. doi:10.1016/j.jdent.2019.07.013
82. Haak R, Näke T, Park K-J, Ziebolz D, Krause F, Schneider H (2019) Internal and marginal adaptation of high-viscosity bulk-fill composites in class II cavities placed with different adhesive strategies. *Odontology* 107(3):374–382. doi:10.1007/s10266-018-0402-1
83. Haller B (2009) Die postoperative Hypersensitivität. *zm* 99(6):44–51

84. Hamlin NJ, Bailey C, Motyka NC, Vandewalle KS (2016) Effect of Tooth-structure Thickness on Light Attenuation and Depth of Cure. *Oper Dent* 41(2):200–207. doi:10.2341/15-067-L
85. Han SH, Park SH (2017) Comparison of Internal Adaptation in Class II Bulk-fill Composite Restorations Using Micro-CT. *Oper Dent* 42(2):203–214. doi:10.2341/16-023-L
86. Heck K, Manhart J, Hickel R, Diegritz C (2018) Clinical evaluation of the bulk fill composite QuiXfil in molar class I and II cavities. 10-year results of a RCT. *Dent Mater* 34(6):e138-e147. doi:10.1016/j.dental.2018.03.023
87. Heintze SD, Zimmerli B (2011) Relevance of in vitro tests of adhesive and composite dental materials, a review in 3 parts. Part 1: Approval requirements and standardized testing of composite materials according to ISO specifications. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 121(9):804–816
88. Hellwig E, Klimek J, Attin T (2009) Einführung in die Zahnerhaltung. Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie ; mit 60 Tab, 5. Aufl. Dt. Zahnärzte-Verl., Köln
89. Herrgott AM, Ziemiecki TL, Dennison JB (1989) An evaluation of different composite resin systems finished with various abrasives. *J Am Dent Assoc* 119(6):729–732. doi:10.14219/jada.archive.1989.0266
90. Hervás-García A, Martínez-Lozano MA, Cabanes-Vila J, Barjau-Escribano A, Fosalve P (2006) Composite resins. A review of the materials and clinical indications. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 11(2):E215-20
91. Hickel R, Roulet J-F, Bayne S, Heintze SD, Mjör IA, Peters M, Rousson V, Randall R, Schmalz G, Tyas M, Vanherle G (2007) Recommendations for conducting controlled clinical studies of dental restorative materials. *Clin Oral Investig* 11(1):5–33. doi:10.1007/s00784-006-0095-7
92. Hickel R, Peschke A, Tyas M, Mjör I, Bayne S, Peters M, Hiller K-A, Randall R, Vanherle G, Heintze SD (2010) FDI World Dental Federation: clinical criteria for the evaluation of direct and indirect restorations-update and clinical examples. *Clin Oral Investig* 14(4):349–366. doi:10.1007/s00784-010-0432-8
93. Ibarra ET, Lien W, Casey J, Dixon SA, Vandewalle KS (2015) Physical properties of a new sonically placed composite resin restorative material. *Gen Dent* 63(3):51–56

94. Ikemura K, Endo T (2010) A review of the development of radical photopolymerization initiators used for designing light-curing dental adhesives and resin composites. *Dent Mater J* 29(5):481–501. doi:10.4012/dmj.2009-137
95. Ilie N, Kunzelmann KH (2005) Werkstoffkundliche Untersuchungen zu Kompositen. *Dtsch zahnärztl Z* 60:321–334
96. Ilie N, Hickel R (2011) Investigations on a methacrylate-based flowable composite based on the SDR™ technology. *Dent Mater* 27(4):348–355. doi:10.1016/j.dental.2010.11.014
97. Ilie N, Keßler A, Durner J (2013) Influence of various irradiation processes on the mechanical properties and polymerisation kinetics of bulk-fill resin based composites. *J Dent* 41(8):695–702. doi:10.1016/j.jdent.2013.05.008
98. Ilie N, Schöner C, Bücher K, Hickel R (2014) An in-vitro assessment of the shear bond strength of bulk-fill resin composites to permanent and deciduous teeth. *J Dent* 42(7):850–855. doi:10.1016/j.jdent.2014.03.013
99. Ilie N, Stawaczyk B (2014) Bulk-Fill-Komposite: neue Entwicklungen oder doch herkömmliche Komposite. *ZMK* 30(3):90–97
100. Ilie N, Bucuta S, Draenert M (2013) Bulk-fill resin-based composites. An in vitro assessment of their mechanical performance. *Oper Dent* 38(6):618–625. doi:10.2341/12-395-L
101. Ilie N, Stark K (2014) Curing behaviour of high-viscosity bulk-fill composites. *J Dent* 42(8):977–985. doi:10.1016/j.jdent.2014.05.012
102. Jafarzadeh T-S, Erfan M, Behroozibakhsh M, Fatemi M, Masaeli R, Rezaei Y, Bagheri H, Erfan Y (2015) Evaluation of Polymerization Efficacy in Composite Resins via FT-IR Spectroscopy and Vickers Microhardness Test. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 9(4):226–232. doi:10.15171/joddd.2015.041
103. Jung JH, Park SH (2017) Comparison of Polymerization Shrinkage, Physical Properties, and Marginal Adaptation of Flowable and Restorative Bulk Fill Resin-Based Composites. *Oper Dent* 42(4):375–386. doi:10.2341/16-254-L
104. Kaisarly D, Gezawi ME (2016) Polymerization shrinkage assessment of dental resin composites. A literature review. *Odontology* 104(3):257–270. doi:10.1007/s10266-016-0264-3

105. Kalmowicz J, Phebus JG, Owens BM, Johnson WW, King GT (2015) Microleakage of Class I and II Composite Resin Restorations Using a Sonic-resin Placement System. *Oper Dent* 40(6):653–661. doi:10.2341/15-006-L
106. Kapoor N, Bahuguna N, Anand S (2016) Influence of composite insertion technique on gap formation. *J Conserv Dent* 19(1):77–81. doi:10.4103/0972-0707.173205
107. Kerr Corporation (2017) Herculite Ultra Sales Sheet. <https://www.kerrdental.com/kerr-restoratives/herculite-ultra-universal-nanohybrid-dental-composite#docs>. Zugegriffen: 29. Dezember 2019
108. Kerr Corporation (2020) Herculite™ XRV Ultra™. <https://www.kerrdental.com/de-de/zahnaerztliche-restaurationsprodukte/herculite-xrv-ultra-composites#docs>. Zugegriffen: 02. Januar 2020
109. Kerr Corporation (2020) SonicFill™ 2. <https://www.kerrdental.com/de-ch/zahnaerztliche-restaurationsprodukte/sonicfill-2-zahnaerztliche-komposite>. Zugegriffen: 02. Januar 2020
110. Kerr Dental (2016) Herculite™ XRV Ultra™. <https://www.kerrdental.com/de-ch/zahnaerztliche-restaurationsprodukte/herculite-xrv-ultra-zahnaerztliche-komposite#buy>. Zugegriffen: 09. März 2021.205Z
111. Kerr Restoratives (2017) SonicFill Produktbroschüre. <https://www.kerrdental.com/de-ch/zahnaerztliche-restaurationsprodukte/sonicfill-2-zahnaerztliche-komposite#docs>. Zugegriffen: 29. Dezember 2019
112. Keßler A, Kaisarly D, Hickel R, Kunzelmann K-H (2019) Effect of fiber incorporation on the contraction stress of composite materials. *Clin Oral Investig* 23(3):1461–1471. doi:10.1007/s00784-018-2572-1
113. Kielbassa AM, Lynch CD, Wilson NH (2014) Editorial: the Minamata convention: the beginning of the (amalgam-free) future? *Quintessence Int* 45(7):547–548. doi:10.3290/j.qi.a32032
114. Kim K-H, Ong JL, Okuno O (2002) The effect of filler loading and morphology on the mechanical properties of contemporary composites. *J Prosthet Dent* 87(6):642–649. doi:10.1067/mpr.2002.125179

115. Körner P, Wegehaupt FJ, Attin T (2021) Einschätzung von Zahnärzten zu vermuteten Gründen für das Scheitern von Kompositfüllungen mittels Adhäsivtechnik. *Swiss Dent J* 131(1):45–52
116. Krämer N, García-Godoy F, Frankenberger R (2005) Evaluation of resin composite materials. Part II: in vivo investigations. *Am J Dent* 18(2):75–81
117. Krämer N, Reinelt C, Frankenberger R (2015) Ten-year Clinical Performance of Posterior Resin Composite Restorations. *J Adhes Dent* 17(5):433–441. doi:10.3290/j.jad.a35010
118. Kubo S, Yokota H, Yokota H, Hayashi Y (2013) Challenges to the clinical placement and evaluation of adhesively-bonded, cervical composite restorations. *Dent Mater* 29(1):10–27. doi:10.1016/j.dental.2012.08.003
119. Kwong SM, Cheung GSP, Kei LH, Itthagarun A, Smales RJ, Tay FR, Pashley DH (2002) Micro-tensile bond strengths to sclerotic dentin using a self-etching and a total-etching technique. *Dent Mater* 18(5):359–369. doi:10.1016/s0109-5641(01)00051-3
120. Labella R, Lambrechts P, van Meerbeek B, Vanherle G (1999) Polymerization shrinkage and elasticity of flowable composites and filled adhesives. *Dent Mater* 15(2):128–137. doi:10.1016/s0109-5641(99)00022-6
121. Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J (2009) Zahnärztliche Propädeutik. Einführung in die Zahnheilkunde ; mit 34 Tabellen, 11. Aufl. Dt. Zahnärzte-Verl., Köln
122. Lindberg A, van Dijken JWV, Lindberg M (2007) Nine-year evaluation of a poly-acid-modified resin composite/resin composite open sandwich technique in Class II cavities. *J Dent* 35(2):124–129. doi:10.1016/j.jdent.2006.06.003
123. Lins RBE, Aristilde S, Osório JH, Cordeiro CMB, Yanikian CRF, Bicalho AA, Stape THS, Soares CJ, Martins LRM (2019) Biomechanical behaviour of bulk-fill resin composites in class II restorations. *J Mech Behav Biomed Mater* 98:255–261. doi:10.1016/j.jmbbm.2019.06.032
124. Loguercio AD, Paula EA de, Hass V, Luque-Martinez I, Reis A, Perdigão J (2015) A new universal simplified adhesive: 36-Month randomized double-blind clinical trial. *J Dent* 43(9):1083–1092. doi:10.1016/j.jdent.2015.07.005
125. Lutz F, Phillips RW (1983) A classification and evaluation of composite resin systems. *J Prosthet Dent* 50(4):480–488. doi:10.1016/0022-3913(83)90566-8

126. Manhart J, Kunzelmann KH, Chen HY, Hickel R (2000) Mechanical properties of new composite restorative materials. *J Biomed Mater Res* 53(4):353–361.
doi:10.1002/1097-4636(2000)53:4<353::aid-jbm9>3.0.co;2-b
127. Manhart J, Chen H, Hamm G, Hickel R (2004) Buonocore Memorial Lecture. Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition. *Oper Dent* 29(5):481–508
128. Marghalani HY (2010) Effect of filler particles on surface roughness of experimental composite series. *J Appl Oral Sci* 18(1):59–67. doi:10.1590/s1678-77572010000100011
129. Marquillier T, Doméjean S, Le Clerc J, Chemla F, Gritsch K, Maurin J-C, Millet P, Pérard M, Grosogoeat B, Dursun E (2018) The use of FDI criteria in clinical trials on direct dental restorations: A scoping review. *J Dent* 68:1–9.
doi:10.1016/j.jdent.2017.10.007
130. Marshall GW (1993) Dentin: microstructure and characterization. *Quintessence Int* 24(9):606–617
131. Marshall GW, Marshall SJ, Kinney JH, Balooch M (1997) The dentin substrate. Structure and properties related to bonding. *J Dent* 25(6):441–458.
doi:10.1016/s0300-5712(96)00065-6
132. Masarwa N, Mohamed A, Abou-Rabii I, Abu Zaghlan R, Steier L (2016) Longevity of Self-etch Dentin Bonding Adhesives Compared to Etch-and-rinse Dentin Bonding Adhesives. A Systematic Review. *J Evid Based Dent Pract* 16(2):96–106.
doi:10.1016/j.jebdp.2016.03.003
133. Mjör IA (1997) The reasons for replacement and the age of failed restorations in general dental practice. *Acta Odontol Scand* 55(1):58–63.
doi:10.3109/00016359709091943
134. Mjör IA, Dahl JE, Moorhead JE (2000) Age of restorations at replacement in permanent teeth in general dental practice. *Acta Odontol Scand* 58(3):97–101.
doi:10.1080/000163500429208
135. Moda MD, Godas AGdL, Fernandes JC, Suzuki TYU, Guedes APA, Briso ALF, Bedran-Russo AK, Dos Santos PH (2018) Comparison of different polishing methods on the surface roughness of microhybrid, microfill, and nanofill composite resins. *J Investig Clin Dent* 9(1). doi:10.1111/jicd.12287

136. Mosharrafian S, Heidari A, Rahbar P (2017) Microleakage of Two Bulk Fill and One Conventional Composite in Class II Restorations of Primary Posterior Teeth. *J Dent (Tehran)* 14(3):123–131
137. Moszner N, Fischer UK, Ganster B, Liska R, Rheinberger V (2008) Benzoyl germanium derivatives as novel visible light photoinitiators for dental materials. *Dent Mater* 24(7):901–907. doi:10.1016/j.dental.2007.11.004
138. Munck J de, van Meerbeek B, Satoshi I, Vargas M, Yoshida Y, Armstrong S, Lambrechts P, Vanherle G (2003) Microtensile bond strengths of one- and two-step self-etch adhesives to bur-cut enamel and dentin. *Am J Dent* 16(6):414–420
139. Munck J de, van Landuyt K, Peumans M, Poitevin A, Lambrechts P, Braem M, van Meerbeek B (2005) A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue. Methods and results. *J Dent Res* 84(2):118–132. doi:10.1177/154405910508400204
140. Nawareg MMA, Zidan AZ, Zhou J, Chiba A, Tagami J, Pashley DH (2015) Adhesive sealing of dentin surfaces in vitro. A review. *Am J Dent* 28(6):321–332
141. Neubauer J, Rzanny A, Göbel R, Fachet M, Küpper H (2017) Komposite im werkstoffkundlichen Vergleich – Hinweise für den Praktiker. *ZWR* 126(09):406–417. doi:10.1055/s-0043-117563
142. Ólafsson VG, Ritter AV, Swift EJ, Boushell LW, Ko C-C, Jackson GR, Ahmed SN, Donovan TE (2018) Effect of composite type and placement technique on cuspal strain. *J Esthet Restor Dent* 30(1):30–38. doi:10.1111/jerd.12339
143. Opdam NJM, van de Sande FH, Bronkhorst E, Cenci MS, Bottenberg P, Pallesen U, Gaengler P, Lindberg A, Huysmans MCDNJM, van Dijken JW (2014) Longevity of posterior composite restorations: a systematic review and meta-analysis. *J Dent Res* 93(10):943–949. doi:10.1177/0022034514544217
144. Orłowski M, Tarczydło B, Chałas R (2015) Evaluation of marginal integrity of four bulk-fill dental composite materials. In vitro study. *ScientificWorldJournal* 2015:701262. doi:10.1155/2015/701262
145. Oßwald-Dame U (2019) S1-Leitlinie für Kompositrestaurationen im Seitenzahn-bereich. *der junge zahnarzt* 10(4):35–37. doi:10.1007/s13279-019-0061-9

146. Oter B, Deniz K, Cehreli SB (2018) Preliminary data on clinical performance of bulk-fill restorations in primary molars. *Niger J Clin Pract* 21(11):1484–1491.
doi:10.4103/njcp.njcp_151_18
147. Oz FD, Attar N, Sungur DD (2019) The influence of restorative material and glass fiber posts on fracture strength of endodontically treated premolars after extensive structure loss. *Niger J Clin Pract* 22(6):782–789.
doi:10.4103/njcp.njcp_11_19
148. Ozel E, Tuna EB, Firatli E (2016) The effects of cavity-filling techniques on micro-leakage in class II resin restorations prepared with Er. YAG laser and diamond bur: A scanning electron microscopy study. *Scanning* 38(5):389–395.
doi:10.1002/sca.21282
149. Ozer F, Blatz MB (2013) Self-etch and etch-and-rinse adhesive systems in clinical dentistry. *Compend Contin Educ Dent* 34(1):12-4, 16, 18; quiz 20, 30
150. Park J, Chang J, Ferracane J, Lee IB (2008) How should composite be layered to reduce shrinkage stress. Incremental or bulk filling? *Dent Mater* 24(11):1501–1505. doi:10.1016/j.dental.2008.03.013
151. Patanjali S, Arora A, Arya A, Grewal MS (2019) An In Vitro Study of Effect of Beveling of Enamel on Microleakage and Shear Bond Strength of Adhesive Systems in Primary and Permanent Teeth. *Int J Clin Pediatr Dent* 12(3):205–210.
doi:10.5005/jp-journals-10005-1623
152. Pearson GJ, Hegarty SM (1987) Cusp movement in molar teeth using dentine adhesives and composite filling materials. *Biomaterials* 8(6):473–476.
doi:10.1016/0142-9612(87)90084-6
153. Pegado REF, do Amaral FLB, Flório FM, Basting RT (2010) Effect of different bonding strategies on adhesion to deep and superficial permanent dentin. *Eur J Dent* 4(2):110–117
154. Perdigão J, Frankenberger R (2001) Effect of solvent and rewetting time on dentin adhesion. *Quintessence Int* 32(5):385–390
155. Perdigão J, Swift EJ, Heymann HO, Malek MA (1998) Effect of a re-wetting agent on the performance of acetone-based dentin adhesives. *Am J Dent* 11(5):207–213

156. Perdigão J, van Meerbeek B, Lopes MM, Ambrose WW (1999) The effect of a re-wetting agent on dentin bonding. *Dent Mater* 15(4):282–295.
doi:10.1016/s0109-5641(99)00049-4
157. Perdigão J, Frankenberger R, Rosa BT, Breschi L (2000) New trends in dentin/enamel adhesion. *Am J Dent* 13(Spec No):25D-30D
158. Pereira R, Lima DANL, Giorgi MCC, Marchi GM, Aguiar FHB (2019) Evaluation of Bond Strength, Nanoleakage, and Marginal Adaptation of Bulk-fill Composites Submitted to Thermomechanical Aging. *J Adhes Dent* 21(3):255–264.
doi:10.3290/j.jad.a42547
159. Peumans M, Munck J de, van Landuyt K, van Meerbeek B (2015) Thirteen-year randomized controlled clinical trial of a two-step self-etch adhesive in non-carious cervical lesions. *Dent Mater* 31(3):308–314. doi:10.1016/j.dental.2015.01.005
160. Peumans M, Wouters L, Munck J de, van Meerbeek B, van Landuyt K (2018) Nine-year Clinical Performance of a HEMA-free One-step Self-etch Adhesive in Noncarious Cervical Lesions. *J Adhes Dent* 20(3):195–203.
doi:10.3290/j.jad.a40630
161. Pioch T, Stotz S, Buff E, Duschner H, Staehle HJ (1998) Influence of different etching times on hybrid layer formation and tensile bond strength. *Am J Dent* 11(5):202–206
162. Poggio C, Chiesa M, Scribante A, Mekler J, Colombo M (2013) Microleakage in Class II composite restorations with margins below the CEJ. In vitro evaluation of different restorative techniques. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 18(5):e793-8.
doi:10.4317/medoral.18344
163. Poorzandpoush K, Shahrabi M, Heidari A, Hosseinipour ZS (2019) Shear Bond Strength of Self-Adhesive Flowable Composite, Conventional Flowable Composite and Resin-Modified Glass Ionomer Cement to Primary Dentin. *Front Dent* 16(1):62–68. doi:10.18502/fid.v16i1.1111
164. Pouyanfar H, Tabaii ES, Aghazadeh S, Nobari SPTN, Imani MM (2018) Microtensile Bond Strength of Composite to Enamel Using Universal Adhesive with/without Acid Etching Compared To Etch and Rinse and Self-Etch Bonding Agents. *Open Access Maced J Med Sci* 6(11):2186–2192. doi:10.3889/oamjms.2018.427

165. Preusse PJ, Winter J, Amend S, Roggendorf MJ, Dudek M-C, Krämer N, Frankenberger R (2021) Class II resin composite restorations-tunnel vs. box-only in vitro and in vivo. *Clin Oral Investig* 25(2):737–744. doi:10.1007/s007840050103
166. Price RB (2017) Consensus Statements on Bulk Fill Resin Composites. *CDA essentials* 4(5):29–31
167. Randolph LD, Palin WM, Leloup G, Leprince JG (2016) Filler characteristics of modern dental resin composites and their influence on physico-mechanical properties. *Dent Mater* 32(12):1586–1599. doi:10.1016/j.dental.2016.09.034
168. Reichl F-X (2003) Toxikologie zahnärztlicher Restaurationsmaterialien. *zm* (7)
169. Retzlaff T, Gängler P (2015) Functional period of initial amalgam fillings after ten and more years. *Dtsch zahnärztl Z* 70(1):33–42
170. Rodríguez-Lozano FJ, Serrano-Belmonte I, Pérez Calvo JC, Coronado-Parra MT, Bernabeu-Esclapez A, Moraleda JM (2013) Effects of two low-shrinkage composites on dental stem cells (viability, cell damaged or apoptosis and mesenchymal markers expression). *J Mater Sci Mater Med* 24(4):979–988. doi:10.1007/s10856-013-4849-x
171. Roggendorf MJ, Krämer N, Appelt A, Naumann M, Frankenberger R (2011) Marginal quality of flowable 4-mm base vs. conventionally layered resin composite. *J Dent* 39(10):643–647. doi:10.1016/j.jdent.2011.07.004
172. Rosa WLdOd, Piva E, Silva AFd (2015) Bond strength of universal adhesives. A systematic review and meta-analysis. *J Dent* 43(7):765–776. doi:10.1016/j.jdent.2015.04.003
173. Roulet JF (1997) Benefits and disadvantages of tooth-coloured alternatives to amalgam. *J Dent* 25(6):459–473. doi:10.1016/s0300-5712(96)00066-8
174. Rueggeberg FA, Caughman WF, Curtis JW, Davis HC (1993) Factors affecting cure at depths within light-activated resin composites. *Am J Dent* 6(2):91–95
175. Rullman I, Patyna M, Janssen B, Willershausen B (2017) Determination of polymerization shrinkage of different composites using a photoelastic method. *Am J Dent* 30(1):16–22
176. Ryge G, Snyder M (1973) Evaluating the clinical quality of restorations. *J Am Dent Assoc* 87(2):369–377. doi:10.14219/jada.archive.1973.0421

177. Sajnani AR, Hegde MN (2016) Leaching of monomers from bulk-fill composites. An in vitro study. *J Conserv Dent* 19(5):482–486. doi:10.4103/0972-0707.190020
178. Sarapultseva M, Sarapultsev A (2019) Flowable Bulk-Fill Materials Compared to Nano Ceramic Composites for Class I Cavities Restorations in Primary Molars. A Two-Year Prospective Case-Control Study. *Dent J (Basel)* 7(4). doi:10.3390/dj7040094.
179. Schäfer E (1999) Geschichtliche Entwicklung, Klassifikation und Haftungsmechanismen der Dentinadhäsive. *ZWR* 4:218–225
180. Schmidseider J, Munz T (Hrsg) (2009) Ästhetische Zahnmedizin. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
181. Shahidi C, Krejci I, Dietschi D (2017) In Vitro Evaluation of Marginal Adaptation of Direct Class II Composite Restorations Made of Different "Low-Shrinkage" Systems. *Oper Dent* 42(3):273–283. doi:10.2341/15-217-L
182. Shimada Y, Yoshiyama M, Tagami J, Sumi Y (2020) Evaluation of dental caries, tooth crack, and age-related changes in tooth structure using optical coherence tomography. *Jpn Dent Sci Rev* 56(1):109–118. doi:10.1016/j.jdsr.2020.08.001
183. Singhal S, Gurtu A, Singhal A, Bansal R, Mohan S (2017) Effect of Different Composite Restorations on the Cuspal Deflection of Premolars Restored with Different Insertion Techniques- An In vitro Study. *J Clin Diagn Res* 11(8):ZC67-ZC70. doi:10.7860/JCDR/2017/20159.10440
184. Soares CJ, Faria-E-Silva AL, Rodrigues MdP, Vilela ABF, Pfeifer CS, Tantbirojn D, Versluis A (2017) Polymerization shrinkage stress of composite resins and resin cements - What do we need to know? *Braz Oral Res* 31(suppl 1):e62. doi:10.1590/1807-3107BOR-2017.vol31.0062
185. Sofan E, Sofan A, Palaia G, Tenore G, Romeo U, Migliau G (2017) Classification review of dental adhesive systems: from the IV generation to the universal type. *Ann Stomatol (Roma)* 8(1):1–17. doi:10.11138/ads/2017.8.1.001
186. Soltész U (2004) Polymerisationsschrumpfung neuer Komposit-Füllungswerkstoffe. *zm* (8)
187. Swapna MU, Koshy S, Kumar A, Nanjappa N, Benjamin S, Nainan MT (2015) Comparing marginal microleakage of three Bulk Fill composites in Class II cavities

- using confocal microscope. An in vitro study. *J Conserv Dent* 18(5):409–413.
doi:10.4103/0972-0707.164058
188. Tardem C, Albuquerque EG, Lopes LdS, Marins SS, Calazans FS, Poubel LA, Barcelos R, Barceleiro MdO (2019) Clinical time and postoperative sensitivity after use of bulk-fill (syringe and capsule) vs. incremental filling composites. A randomized clinical trial. *Braz Oral Res* 33(0):e089. doi:10.1590/1807-3107bor-2019.vol33.0089
 189. Tarle Z, Attin T, Marovic D, Andermatt L, Ristic M, Tauböck TT (2015) Influence of irradiation time on subsurface degree of conversion and microhardness of high-viscosity bulk-fill resin composites. *Clin Oral Investig* 19(4):831–840.
doi:10.1007/s00784-014-1302-6
 190. Taschner M, Nato F, Mazzoni A, Frankenberger R, Falconi M, Petschelt A, Breschi L (2012) Influence of preliminary etching on the stability of bonds created by one-step self-etch bonding systems. *Eur J Oral Sci* 120(3):239–248.
doi:10.1111/j.1600-0722.2012.00960.x
 191. Tauböck TT (2013) Bulk-Fill-Komposite. *BZB*:50–54
 192. Tauböck TT, Attin T (2016) Bulk-Fill-Komposite. *Swiss Dent J* 126(7-8):694–695
 193. Tauböck TT, Dieckmann P, Attin T (2019) Neuartige Komposite zur vereinfachten Füllungstherapie. *zm* 109(23-24):2690–2695
 194. Tauböck TT, Jäger F, Attin T (2019) Polymerization shrinkage and shrinkage force kinetics of high- and low-viscosity dimethacrylate- and ormocer-based bulk-fill resin composites. *Odontology* 107(1):103–110. doi:10.1007/s10266-018-0369-y
 195. van Dijken JWV, Pallesen U (2014) A randomized controlled three year evaluation of "bulk-filled" posterior resin restorations based on stress decreasing resin technology. *Dent Mater* 30(9):e245-51. doi:10.1016/j.dental.2014.05.028
 196. van Dijken JWV, Pallesen U (2015) Eight-year randomized clinical evaluation of Class II nanohybrid resin composite restorations bonded with a one-step self-etch or a two-step etch-and-rinse adhesive. *Clin Oral Investig* 19(6):1371–1379.
doi:10.1007/s00784-014-1345-8
 197. van Dijken JWV, Pallesen U (2016) Posterior bulk-filled resin composite restorations. A 5-year randomized controlled clinical study. *J Dent* 51:29–35.
doi:10.1016/j.jdent.2016.05.008

198. van Dijken JWV, Pallesen U (2017) Bulk-filled posterior resin restorations based on stress-decreasing resin technology. A randomized, controlled 6-year evaluation. *Eur J Oral Sci* 125(4):303–309. doi:10.1111/eos.12351
199. van Dijken JW, Pallesen U (2015) Randomized 3-year clinical evaluation of Class I and II posterior resin restorations placed with a bulk-fill resin composite and a one-step self-etching adhesive. *J Adhes Dent* 17(1):81–88. doi:10.3290/j.jad.a33502
200. van Ende A, Munck J de, Lise DP, van Meerbeek B (2017) Bulk-Fill Composites: A Review of the Current Literature. *J Adhes Dent* 19(2):95–109. doi:10.3290/j.jad.a38141
201. van Meerbeek B, Yoshida Y, Lambrechts P, Vanherle G, Duke ES, Eick JD, Robinson SJ (1998) A TEM study of two water-based adhesive systems bonded to dry and wet dentin. *J Dent Res* 77(1):50–59. doi:10.1177/00220345980770010501
202. van Meerbeek B, Yoshihara K, van Landuyt K, Yoshida Y, Peumans M (2020) From Buonocore's Pioneering Acid-Etch Technique to Self-Adhering Restoratives. A Status Perspective of Rapidly Advancing Dental Adhesive Technology. *J Adhes Dent* 22(1):7–34. doi:10.3290/j.jad.a43994
203. Versluis A, Douglas WH, Cross M, Sakaguchi RL (1996) Does an incremental filling technique reduce polymerization shrinkage stresses? *J Dent Res* 75(3):871–878. doi:10.1177/00220345960750030301
204. Weilenmann W (2021.000Z) Einschleifen und Ansetzen – Vermeidung von Wurzelbehandlungen und Extraktionen. <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/kieferorthopaedie/funktions-kfocmd/einschleifen-und-ansetzen-vermeidung-von-wurzelbehandlungen-und-extraktionen>. Zugegriffen: 10. April 2021.161Z
205. Yazici AR, Antonson SA, Kutuk ZB, Ergin E (2017) Thirty-Six-Month Clinical Comparison of Bulk Fill and Nanofill Composite Restorations. *Oper Dent* 42(5):478–485. doi:10.2341/16-220-C
206. Yildiz E, Karaarslan ES, Simsek M, Cebe F, Ozsevik AS, Ozturk B (2015) Effect of a re-wetting agent on bond strength of an adhesive to primary and permanent teeth dentin after different etching techniques. *Niger J Clin Pract* 18(3):364–370. doi:10.4103/1119-3077.151786



207. Zhu JJ, Tang ATH, Matinlinna JP, Hägg U (2014) Acid etching of human enamel in clinical applications. A systematic review. *J Prosthet Dent* 112(2):122–135.
doi:10.1016/j.prosdent.2013.08.024
208. Zimmerli B, Strub M, Jeger F, Stadler O, Lussi A (2010) Composite materials. Composition, properties and clinical applications. A literature review. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 120(11):972–986

9 Anhang

9.1 Materialliste

- Mundspiegel
(9000753, Henry Schein Dental GmbH, Langen, Germany)
- Zahnärztliche Sonde
(3007-9, A. Schweickhardt GmbH&Co. KG, Seitingen-Oberflacht, Germany)
- Pinzette
(2875, A. Schweickhardt GmbH&Co. KG, Seitingen-Oberflacht, Germany)
- Schaumstoffpellet
(72702, Omnident Dental Handelsgesellschaft, Rodgau, Germany)
- Kältespray
(750182, Basiq Dental GmbH, Krefeld, Germany)
- Matrizenband
(1002/30, Hawe Toffelmire Matrices, KerrHawe SA, Bioggio, Switzerland)
- Fotospiegel
(464/1, Carl Martin GmbH, Solingen, Germany)
- Kamera
(Olympus E-620, Olympus K.K., Shinjuku, Tokio, Japan)
- Makroobjektiv
(Makro 105mm F2,8 EX DG OS HSM, Sigma GmbH, Rödermark, Germany)
- Ringblitz
(Olympus FS-SRF11, Olympus K.K., Shinjuku, Tokio, Japan)

9.2 Untersuchungsbogen

 Philipps Universität Marburg	 UKGM UNIVERSITÄTSKLINIKUM GIESSEN UND MARBURG
Klinische Untersuchung SONICFill in der direkten Füllungstherapie	
CRF III Recall	
Codenummer:	Zahn:
Datum des Recalls:	Recall: <input type="checkbox"/> Monate
Datum der Füllungslegung:	Material: <input type="checkbox"/> SonicFill <input type="checkbox"/> HU
Untersucher: <input type="checkbox"/> Prof. Dr. Frankenberger <input type="checkbox"/> ZÄ Rettinger	

Bewertung erfolgt jeweils in den FDI Grades 1-5



FDI 11: Postoperative Hypersensitivität ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5

FDI 11: Vitalität ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5

VAS:



subjektive Beschwerden bei Temperaturreiz (durch den Patienten auszufüllen)

Keine Beschwerden maximal denkbarer Schmerz



subjektive Aufbissbeschwerden (durch den Patienten auszufüllen)

Keine Beschwerden maximal denkbarer Schmerz



Randqualität:

Randverfärbung (FDI 2.b)	1 2 3 4 5	% ca.: _____
marginal Randfraktur (FDI 6.a)	1 2 3 4 5	% ca.: _____
Spalt (FDI 6.b)	1 2 3 4 5	% ca.: _____
Randdefizite (FDI 6.c)	1 2 3 4 5	% ca.: _____
Sekundärkaries (FDI 12)	1 2 3 4 5	% ca.: _____

FDI 1: OberflächenglanzGlanz: ☐ 1 ☐ 2.1 ☐ 3.1 ☐ 4.1 ☐ 5Poren: ☐ 1 ☐ 2.2 ☐ 3.2 ☐ 4.2**FDI 2a : Oberflächenverfärbung** ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5**FDI 3: Farbübereinstimmung und Transluzenz**Farbe: ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5Transluzenz: ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5**FDI 5: Fraktur von Material und Retention**☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5**FDI 8: Approximalkontakte**mesial ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5distal ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5**FDI 10: Patientensicht** ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5wenn FDI 10 > 1 Präzisierung der Kritik: ☐ 10.1 mit Ästhetik unzufrieden☐ 10.2 mit Funktion unzufrieden ☐ 10.3 mit Behandlungsprozedere unzufrieden**FDI 13: Zahnintegrität**☐ 1(totale Unversehrtheit) ☐ 2.1(marginale Schmelzfraktur) ☐ 3.1(Schmelzdefekt) ☐ 4.1(Spalt)Riss(e) ☐ 2.2 ☐ 3.2 ☐ 4.2 Chipping ☐ 3.3 ☐ 4.3 ☐ 5 Zahnfraktur

Bemerkungen: _____

Datum und Unterschrift Prüfer:

9.3 DSGVO-Einverständniserklärung



Medizinisches Zentrum für
Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Abteilung für Zahnerhaltungskunde
Direktor: Prof. Dr. Roland Franken-

Einverständniserklärung in die Verwendung meiner personenbezogenen Daten im Rahmen medizinischer Forschung

Ich,

Name: _____

Vorname: _____

Geboren am: _____

erkläre mich mit den ausliegenden Datenschutzbedingungen einverstanden.

Über den geplanten Ablauf bin ich in einem persönlichen Gespräch von meiner Zahnärztin/meinem Zahnarzt aufgeklärt worden.

Ich kann jederzeit ohne Angaben von Gründen meine Einwilligung widerrufen.
Dadurch entstehen mir keinerlei Nachteile.

Ort, Datum

Unterschrift

9.4 Fragebogen zur Prävention 2019-nCoV



Philipps

Universität
Marburg



Medizinisches Zentrum für
Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Abteilung für Zahnerhaltungskunde
Direktor: Prof. Dr. Roland Franken-

Fragebogen zur Prävention 2019-nCoV

Vor- /Nachname: _____

Hatten Sie innerhalb der letzten 14 Tage Fieber oder erhöhte Körpertemperatur?

☐ Ja ☐ Nein

Haben Sie innerhalb der letzten 14 Tage Atemprobleme, wie Husten oder Atembeschwerden, festgestellt?

☐ Ja ☐ Nein

Waren Sie in den letzten 14 Tagen in einer Gegend mit bekanntermaßen hohem Anteil an mit dem sog. Corona-Virus infizierten Personen?

☐ Ja ☐ Nein

Standen Sie innerhalb der letzten 14 Tage mit einer an dem Corona-Virus erkrankten Person in Kontakt?

☐ Ja ☐ Nein

Sind Sie in den letzten 14 Tagen mit Personen in Kontakt gekommen, bei denen Atemwegsprobleme und/oder Fieber bestanden?

☐ Ja ☐ Nein

Haben Sie kürzlich an Versammlungen bzw. Besprechungen teilgenommen oder hatten Sie engen Kontakt zu vielen unbekannten Personen?

☐ Ja ☐ Nein

Ort, Datum

Unterschrift

9.5 Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus datenschutzrechtlichen Gründen entfernt.

9.6 Verzeichnis der akademischen Lehrer/-innen

Meine akademischen Lehrer waren die Damen und Herren:

Arweiler, Auschill, Bette, Braun, Cetin, Czubayko, Draenert, Frankenberger, Feuser, Gente, Gloerfeld, Güldner, Hildebrandt, Höffken, Jablonski-Momeni, Kinscherf, Korbmacher-Steiner, Lill, Lotzmann, Mengel, Milani, Mittag, Moll, Mutters, Neff, Neumüller, Nonnenmacher, Pieper, Ramaswamy, Richter, Roggendorf, Steiniger, Teymoortash, Weber, Weihe, Westermann, Wrocklage

9.7 Danksagung

Mein ganz besonderer und herzlichster Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Roland Frankenberger, für seine Unterstützung bei den Untersuchungen, die hervorragende Betreuung, die zuverlässige Erreichbarkeit und freundliche Zusammenarbeit!

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Dr. Thomas Seitner sowie Herrn Dr. Severin Holl bedanken, ohne deren Mitarbeit die Durchführung der Studie nicht möglich gewesen wäre. Danke für die freundliche Kommunikation, die exzellente Vorbereitung und Unterstützung bei der Durchführung und die Bereitschaft, uns bei diesem Vorhaben zu begleiten.

Ebenso danke ich Carsten Speike für die intensiven Diskussionen, hilfreichen Gespräche und den bereichernden Austausch, sowie das zahllose Korrekturlesen!

Danke an Charlotte Werdin für ihre immerwährende Unterstützung, stetige Ermutigung und wertvolle Begleitung!

Danke – von ganzem Herzen – an meine Familie und meinen Mann, die immer für mich da waren und sind. Es gibt keine Worte dafür, wie wichtig ihr mir seid!